

## D. UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE

Die im Text angewendeten Richtungsbezeichnungen an der Klaue werden im Kapitel H. Abbildungen (Abb. 1) zur Orientierung aufgezeigt.

### 1. Makroskopische und mesoskopische Befunde an der Klaue des Rindes

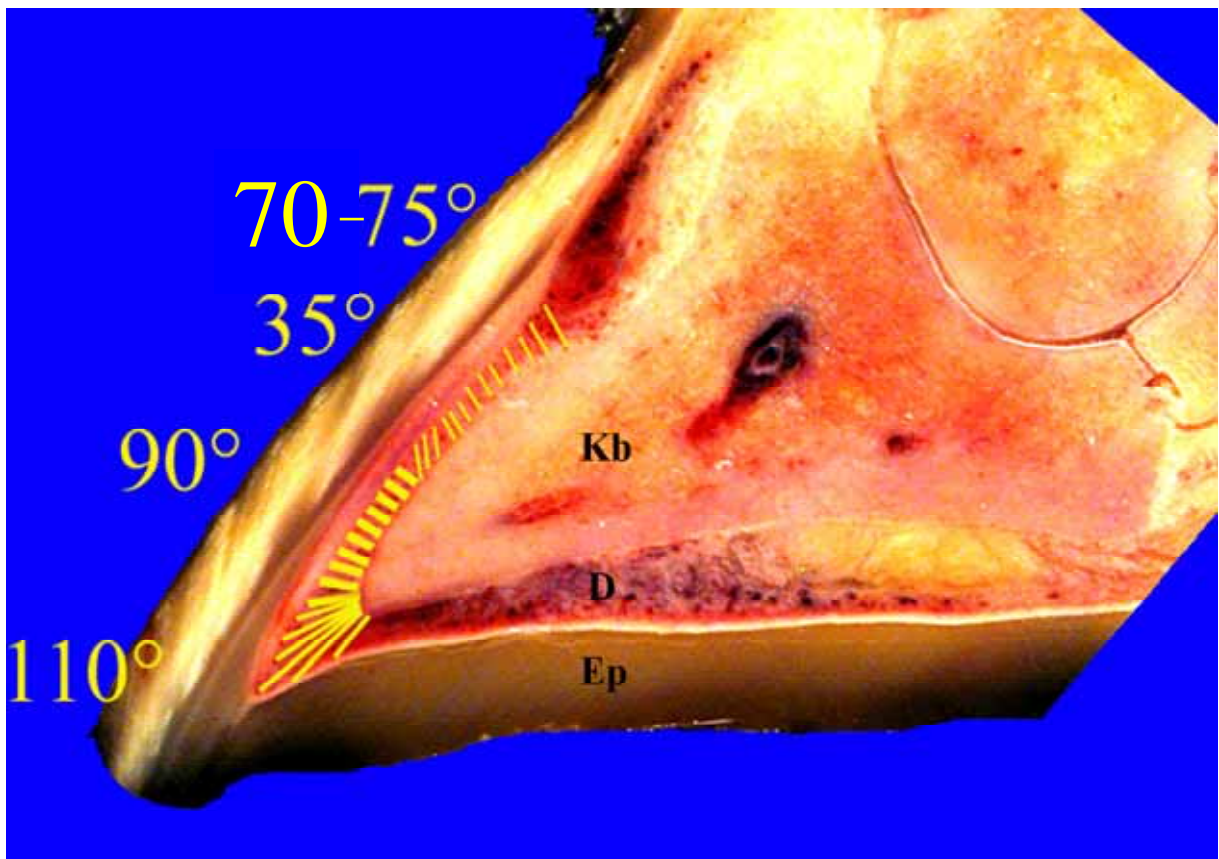
Die bei der Belastung durch das Körpergewicht auf das Klauenbein einwirkende Drucklast wird als Zugkraft vornehmlich über Kollagenfaserzüge des Wandsegmentes diskontinuierlich über die Epidermis auf das Kronhorn übertragen. Im Wandsegment ziehen dicht aggregierte kollagene Faserbündel unterschiedlicher Stärke und einer bevorzugten Verlaufsrichtung von der Klauenbeinoberfläche bis in die Lederhautblättchen hinein, wo sie mit der makroskopischen und mesoskopischen Methode nicht mehr weiter verfolgt werden können. Die unter C.1.1 beschriebene Einteilung des Wandsegmentes in einen proximalen, mittleren und distalen Bereich sowie die Klauenbeinspitze respektive den Klauenbeinrand (*Margo solearis*) auf der axialen und abaxialen Wandfläche wird weiterhin aufrecht erhalten. Die unterschiedliche Stärke und die Verlaufsrichtung der kollagenen Faserbündel werden in den verschiedenen Bereichen des Wandsegmentes sowohl in der Sagittal- als auch in drei Transversalebene makroskopisch wie folgt beschrieben.

#### 1.1 **Die Verlaufsrichtung und Stärke der Kollagenfaserbündel in der Sagittalebene der Klaue (Textabb. 12)**

Im proximalen Bereich des Wandsegmentes misst der Abstand von der Klauenbeinoberfläche bis zum First der Lederhautblättchen  $6,03^{15}$  mm, in dem der Großteil der Kollagenfasern ungeordnet verläuft. Im mittleren Bereich des Wandsegmentes haben die dicht aggregierten Kollagenfasern in dünnen Bündeln eine unterschiedliche Verlaufsrichtung. Anfangs wirkt die als Zugkraft übertragene Drucklast des Körpergewichtes in dem Maße, dass die Kollagenfasern des Klauenbeinträgers einen Öffnungswinkel von  $70^\circ$  bis  $75^\circ$  einnehmen. Anschließend verändert sich der Richtungswinkel für eine kurze Strecke auf  $35^\circ$ . Der Abstand der Klauenbeinoberfläche bis zum First der Lederhautblättchen beträgt 4,61 mm. Die dicht aggregierten Kollagenfasern in dicken Bündeln zeichnen sich in dem statisch beanspruchten distalen Bereich des Wandsegmentes durch besondere Breite und Derbheit aus und liegen

---

<sup>15</sup> werden Größenverhältnisse ohne weiteren Vermerk angegeben, handelt es sich um den arithmetischen Mittelwert zur Beschreibung der durchschnittlichen Größe der Einzelwerte



**Textabb. 12: Sagittalschnitt der Klaue**

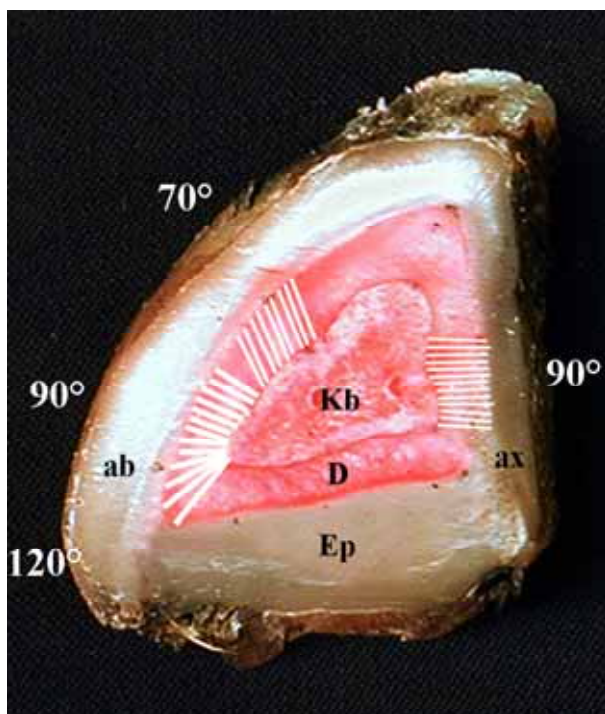
Die Verlaufsrichtung und die unterschiedliche Stärke der kollagenen Faserbündel sind in den verschiedenen Bereichen des Wandsegmentes eingezeichnet. Im mittleren Bereich des Wandsegmentes verlaufen die dicht aggregierten Fasern in relativ feinen Bündeln in einem 70 bis 75° Winkel von der Klauenbeinoberfläche bis zur unverhornten Epidermis. Anschließend verändert sich der Richtungswinkel für eine kurze Strecke auf 35°. Die dicht aggregierten Kollagenfasern in derben Bündeln nähern sich im distalen Bereich des Wandsegmentes einem 90° Winkel. An der Klauenbeinspitze öffnet sich der Richtungswinkel zu einem stumpfen Winkel von 110° und die dicht aggregierten Kollagenfasern ziehen in kräftigen Bündeln fächerförmig in das Stratum lamellatum der Klauen Spitze hinein.

sehr dicht nebeneinander. Im Bereich der größten Konvexität sowohl an der Klauenbeinoberfläche als auch an der Klauenkapsel weist das Wandsegment besonders derbe Kollagenfaserbündel auf, die die Zugfestigkeit in diesem Areal unterstreichen. Im distalen Bereich des Wandsegmentes, in dem die einwirkende Drucklast des Körpergewichtes und die Zugkraft der tiefen Beugesehne mit gleicher Intensität auf das Fasersystem einwirken, nähert sich der Öffnungswinkel der Kollagenfasern einem 90° Winkel. Für den Abstand von der Oberfläche des Klauenbeines bis zum First der Lederhautblättchen wird ein Wert von 5,2 mm ermittelt. An der Klauenbeinspitze überwiegt die Zugkraft der tiefen Beugesehne, die vorwiegend in hori-

zontaler Richtung zieht und diesen Zug durch das Klauenbein auf die Kollagenfasern des Klauenbeinträgers im Wandsegment überträgt. Der Insertionswinkel der Kollagenfasern wird in diesem Areal dadurch größer und öffnet sich zu einem stumpfen Winkel von  $110^\circ$ . An der Klauenbeinspitze verlaufen relativ dicht aggregierte Kollagenfasern in kräftigen Bündeln fächerförmig nach verschiedenen Richtungen in der Sagittalen, die für eine feste Verankerung des Klauenbeinträgers und für die Stabilität des Klauenbeines sorgen. Der Abstand der Klauenbeinoberfläche bis zum First der Lederhautblättchen erreicht in diesem Bereich einen Wert von 9,37 mm.

## 1.2 Die Verlaufsrichtung und Stärke der Kollagenfaserbündel in der Transversalebene 1 bis 3 der Klaue (Textabb. 13 bis 15)

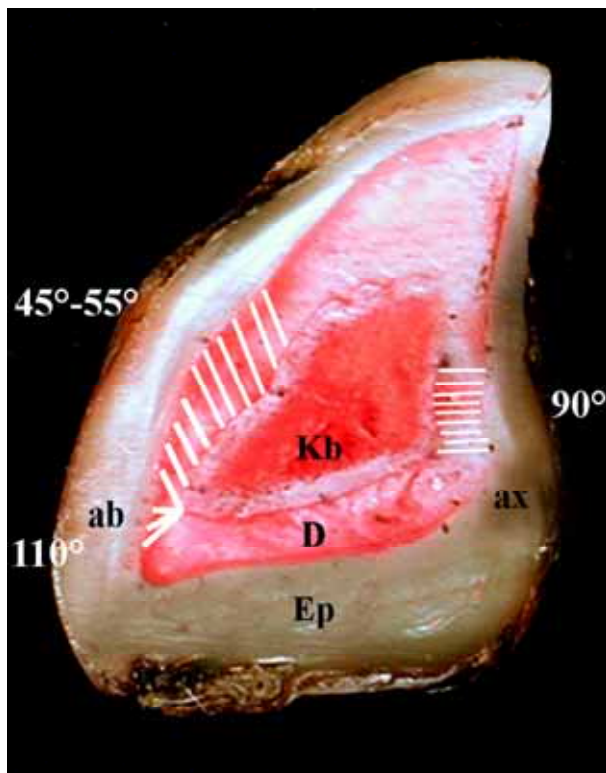
Die Klaue wird im apikalen Drittel, im mittleren und im plantaren Drittel der Klauengrundfläche entsprechend der Angaben unter C.1.1 transversal geschnitten, um die Faserverlaufsrichtung sowie deren Stärke in der jeweiligen Schnittebene zu beurteilen. Die Transversalansicht der Klaue zeigt, dass in den Bereichen des Wandsegmentes der axialen und abaxialen Wandfläche fast die gleiche Situation vorliegt wie am Zehenrücken, mit dem Unterschied, dass die Zugkraft der tiefen Beugesehne in der Transversalebene nur geringgradig zum Tragen kommt und die Strukturen einer mediolateralen Kraft ausgesetzt sind. Die mediolaterale Kraft wird von dem bei der Belastung eintretenden Klauenspreizmechanismus und dem Zug des interdigitalen Bandapparates des Klauengelenkes ausgeübt, der zum Klauenbeinträger gehört. Die Verlaufsrichtung der dicht aggregierten Kollagenfasern wird durch die Art der Beanspruchung bestimmt, so verlaufen die Kollagenfaserbündel in unterschiedlicher Winkelformation vom Klauenbein bis in die Lederhautblättchen hinein.



**Textabb. 13: Transversalansicht im apikalen Drittel der Klaue**

Im mittleren Bereich des Wandsegmentes der apikalen Transversalscheibe ziehen die dicht aggregierten Kollagenfasern in dünnen Bündeln auf der *abaxialen Wandfläche* in einem  $70^\circ$  Winkel von der Klauenbeinoberfläche bis zur unkernten Epidermis. Im distalen Bereich des Wandsegmentes öffnet

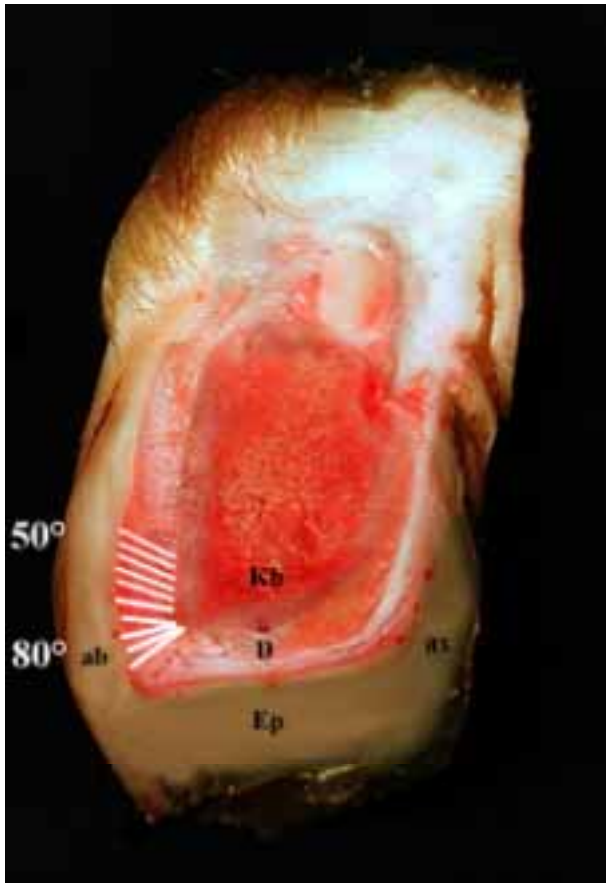
sich der Richtungswinkel auf  $90^\circ$  und am Klauenbeinrand auf  $120^\circ$ . Die kollagenen Faserbündel sind im distalen Bereich des Wandsegmentes in besonders derben Bündeln aggregiert. Im mittleren Bereich des Wandsegmentes ist die Klauenbeinoberfläche glatt und eben, während sie distal mit hohen Knochenlamellen und zahlreichen Gefäßpforten versehen ist. Der Abstand von der Klauenbeinoberfläche bis zum First der Lederhautblättchen nimmt von 3,91 mm im proximalen Bereich des Wandsegmentes bis distal am Klauenbeinrand auf 9,45 mm zu. Auf der gesamten *axialen Wandfläche* ziehen dicht aggregierte Kollagenfasern in feinen Bündeln in einem  $90^\circ$  Winkel von der Klauenbeinoberfläche zur unverhornten Epidermis. In diesem Bereich sind Erhabenheiten und Vertiefungen an der Klauenbeinoberfläche besonders deutlich zu erkennen. Der Abstand von der Klauenbeinoberfläche bis zum First der Lederhautblättchen nimmt von 2,59 mm im proximalen Bereich des Wandsegmentes bis distal am Klauenbeinrand auf 6,82 mm zu.



#### **Textabb. 14: Transversalansicht im zweiten Drittel der Klaue**

An der *abaxialen Wandfläche* der mittleren Transversalscheibe ziehen die kollagenen Faserzüge im mittleren und distalen Bereich des Wandsegmentes in einem Richtungswinkel von  $45^\circ$  bis  $55^\circ$  von der Klauenbeinoberfläche bis zur unverhornten Epidermis. Am Klauenbeinrand strahlen dicht aggregierte Kollagenfasern in derben Bündeln in einem Richtungswinkel von  $110^\circ$  fächerförmig aus und sorgen für eine feste Verankerung des Klauenbeines an der Hornwand. Der Abstand von der Klauenbeinoberfläche bis zum First der Lederhautblättchen nimmt von

6,2 mm im proximalen Bereich des Wandsegmentes bis distal am Klauenbeinrand auf 5,4 mm ab. Die Bindegewebsfasern ziehen auf der *axialen Wandfläche* kontinuierlich in einem  $90^\circ$  Winkel von der Klauenbeinoberfläche bis zur unverhornten Epidermis. Der Abstand von der Klauenbeinoberfläche bis zum First der Lederhautblättchen nimmt von 4,66 mm im proximalen Bereich des Wandsegmentes bis distal am Klauenbeinrand auf 6,38 mm zu.



### **Textabb. 15: Transversalansicht im plantaren Drittel der Klaue**

In der plantaren Transversalansicht der Klaue wird deutlich, dass die dicht aggregierten Kollagenfaserbündel im distalen Bereich des Wandsegmentes in einem Richtungswinkel von  $50^\circ$  von der Klauenbeinoberfläche bis zur unversehrten Epidermis ziehen. Bis zum Klauenbeinrand öffnet sich der Insertionswinkel auf  $80^\circ$  und die Dicke der Kollagenfaserbündel nimmt distal zu. Der Abstand von der Klauenbeinoberfläche bis zum First der Lederhautblättchen beträgt im distalen Bereich des Wandsegmentes 5,87 mm und vergrößert sich am Klauenbeinrand auf 8,28 mm. Auf der *axialen*

*Wandfläche* ist in diesem Bereich kein blättchentragendes Wandsegment mehr ausgebildet. Der Abstand von der Klauenbeinoberfläche bis zur unversehrten Epidermis beträgt 9,07 mm auf der axialen Wandfläche. Dieses Areal wird vorwiegend von einem Fettpolster und Faserzügen des Ballensegmentes ausgefüllt. Am Klauenbeinrand nimmt der Abstand vom Klauenbein bis zur unversehrten Epidermis auf 7,93 mm ab.

## **2. Ergebnisse der rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen**

Die rasterelektronenmikroskopischen (SEM) Untersuchungen erlauben eine dreidimensionale Darstellung der Form und Oberfläche und ermöglichen es, Größenordnung und Ausrichtung der Strukturen des Klauenbeinträgers zu ermitteln. Die im Folgenden aufgeführten Ergebnisse beziehen sich auf die Klauenbeinoberfläche, die Oberflächenmodifikation respektive den Papillarkörper und die dermoepidermale Grenzfläche des Wand- und Sohlensegmentes. Die komplexe Struktur der Epidermisformation wurde ebenfalls untersucht. Für die Beurteilung der Lederhautmodifikation und -oberfläche ist die Kenntnis über die Lokalisation der durchgeführten Trennung von Dermis und Epidermis eine Voraussetzung. Um eine Aussage über

die natürlichen Verhältnisse von der Ausrichtung der Lamellen und Papillen geben zu können, sind Informationen über den Injektionsgrad der Lamellen- und Papillengefäße von großer Bedeutung. Aus diesen Gründen werden die Ergebnisse der transmissionselektronenmikroskopischen (TEM) Voruntersuchung der Trennungsfäche von Dermis und Epidermis und die lichtmikroskopische Voruntersuchung zum Füllungszustand der Lamellen- respektive Papillengefäße an der entsprechenden Textstelle mit aufgeführt.

## 2.1 Die Klauenbeinoberfläche

Das Klauenbein unterliegt aufgrund seiner Lage als distales Element des Gliedmaßenskelettes einer besonders hohen mechanischen Beanspruchung. Die Klauenbeinoberfläche weist eine gewisse Variationsbreite auf, um den funktionellen Aufgaben als Ausdruck der Adaptation zu entsprechen. Das schon makroskopisch auffällige Oberflächenrelief (Abb. 2 b et 2 d.) wird durch Öffnungen von Knochenkanälchen unterbrochen. Um verifizieren zu können, ob diese Knochenöffnungen Ein- und Austrittsstellen für ein knocheneigenes Blutgefäßsystem darstellen, wurden mazerierte Klauenbeine von Tensolzement-injizierten Klauen untersucht. Die Darstellung der Klauenbeinoberfläche ermöglicht eine Beschreibung ihres Oberflächenreliefs von verschiedenen Arealen des Klauenbeines, wobei vor allem die Wandflächen der Ansatzzone des Klauenbeinträgers interessieren (Abb. 2 d). In der Sagittal- und Transversalansicht zeigt die Kompakta des Klauenbeines (Abb. 4 a) nur in Bereichen mit der höchsten Zugbeanspruchung eine Dickenzunahme. Diese Bereiche umfassen die Ansatzzone der Strecksehne und der tiefen Beugesehne, den mittleren und distalen Bereich des Wandsegmentes, an dem besonders starke Kollagenfaserbündel des Klauenbeinträgers am Klauenbein inserieren, und den Processus palmaris/plantaris. In Bereichen einer Dickenzunahme erreicht die Kompakta Werte von 4 mm bis 6 mm. In den anderen Arealen des Klauenbeines ist die Kompakta mit 2 bis 3 mm gleichmäßig dick. Im Bereich der Klauenbeinspitze wurde für die Kompakta eine Dicke von 2 mm ermittelt, ebenso für den gesamten Sohlenbereich.

Der Zehenrücken (*Margo dorsalis*) (Abb. 2 d) erstreckt sich von der Klauenbeinspitze bis zum proximalen Punkt des Klauenbeines, der die Ansatzzone der Strecksehne am Processus extensorius hervorbringt. Die Ansatzzone entspricht einer dreihöckrigen Fläche mit einer gleichmäßigen, relativ glatten Oberfläche. Distal dieser Ansatzzone für die Strecksehne (des Musculus extensor digitalis communis respektive -longus) erstreckt sich ein Areal von ungefähr 1 cm, das durch sehr große Gefäßforten (Abb. 2 b et 2 d) gekennzeichnet ist, die einen maximalen Durchmesser von 2 mm aufweisen. Im mittleren Drittel des Zehenrückens ist die Oberflächenkontur des Klauenbeines netzartig strukturiert (Abb. 2 e). Diese Formation wird

durch parallel angeordnete, proximodistal verlaufende Knochenleisten verursacht, die durch quer verlaufende Knochenbälkchen miteinander verbunden sind. Distal, an dieses Areal angrenzend, zeichnet sich die Klauenbeinoberfläche durch proximodistal verlaufende Knochenleisten aus. Die Breite der Leisten variiert von 100 bis 300  $\mu\text{m}$  bei einer Dichte von 3 bis 6 Leisten pro mm. An der Basis der Leisten und in der rinnenförmigen Vertiefung zwischen den Leisten befinden sich Knochenkanälchen, die in proximodistal orientierten Reihen angeordnet sind und einen Durchmesser von 70 bis 600  $\mu\text{m}$  aufweisen. Diese Gefäßpforten (Abb. 4 c) stehen in einem Abstand von 100  $\mu\text{m}$  bis zu 1,4 mm. Ihr Durchmesser und ihre Anzahl nehmen in proximodistaler Richtung zu. Je mehr Veränderungen das Klauenbein in Form von Aufrauungen und Exostosen (Abb. 4 b) aufweist, desto größer sind Anzahl und Durchmesser (bis zu 1 mm) der in Reihen angeordneten Knochenkanälchen. Die Klauenbeinproben der abaxialen Wandfläche (*Facies parietalis*) liegen distal des Sulcus parietalis, einer dem Klauenbeinrand (*Margo solearis*) im Abstand von 1 cm parallel verlaufenden Gefäßrinne. Die Klauenbeinoberfläche weist im Bereich des Klauenbeinträgers lamellenartige Erhebungen auf, die durch Knochenleisten gebildet werden und in einem  $45^\circ$  Winkel proximodistal verlaufen (Abb. 2 f). Die Knochenleisten nehmen distal an Höhe zu, es werden Werte von bis zu 450  $\mu\text{m}$  erreicht. Bei einer Breite von 120 bis 360  $\mu\text{m}$  und einer Dichte von 3 bis 5 Leisten pro mm erscheinen die rinnenförmigen Vertiefungen bei einer Breite von 80 bis 150  $\mu\text{m}$  relativ schmal. Die in den Rinnen reihenförmig angeordneten Gefäßöffnungen haben eine länglich-ovale Form. Die Knochenkanälchen variieren in ihrer Länge von 100  $\mu\text{m}$  bis zu 2 mm. An der axialen Wandfläche (*Facies axialis*) ist die Klauenbeinoberfläche ebenfalls durch den gleichmäßigen Wechsel von Knochenlamellen und rinnenförmigen Vertiefungen gekennzeichnet (Abb. 2 a). Die Knochenlamellen laufen parallel zum Klauenbeinrand und verstreichen dann am Zehenrücken. Die Knochenlamellen stehen in einem Abstand von 60 bis 200  $\mu\text{m}$  und in einer Dichte von 5 bis 8 Leisten pro mm. Ihre Breite variiert von 100 bis 250  $\mu\text{m}$  und durch ihre geringe Höhe von maximal 100  $\mu\text{m}$  erscheinen sie weniger prominent als die Knochenlamellen auf der abaxialen Wandfläche. Die Sohlenfläche der untersuchten Klauenbeinproben hat bei einer eher unauffälligen Oberflächenbeschaffenheit eine große individuelle Variationsbreite (Abb. 2 c). Klauenbeine von unter 2 Jahre alten Rindern zeigen eine geringfügig raue Oberfläche ohne Gefäßlöcher. Die Rauigkeit der Oberfläche wird durch 20  $\mu\text{m}$  breite, muldenartige Vertiefungen provoziert. Demgegenüber stehen Klauenbeinproben von bis zu 6 Jahre alten Rindern, die große runde Gefäßpforten mit einem Durchmesser von bis zu 2 mm aufweisen. Die Sohlenfläche des Klauenbeines ist von leistenartigen, bogenförmigen Knochenvorsprüngen unterbrochen, die einem bestimmten Muster

folgen. Diese bogenförmigen Erhebungen von 2 mm ziehen in Richtung Klauenbeinspitze und sind besonders deutlich auf der abaxialen Sohlenregion ausgebildet. An der Zehenspitze und der axialen Sohlenfläche sind die Leisten niedriger.

## **2.2 Voruntersuchung über die Trennungsfläche von Dermis und Epidermis und den Injektionsgrad der Lamellen- und Papillengefäße für die rasterelektronenmikroskopische (SEM) Auswertung**

Für die rasterelektronenmikroskopische Untersuchung der dermalen Oberflächenmodifikationen erfolgte stichprobenartig eine transmissionselektronenmikroskopische (TEM) Voruntersuchung, um die genaue Lokalisation der Trennungsfläche von Dermis und Epidermis zu ermitteln. Die Lederhautoberfläche wird überwiegend von der Lamina densa der Basallamina bedeckt, nur vereinzelt wird die darunter liegende Lamina rara sichtbar. Stellenweise sind Basalzellen zu erkennen, die an der Oberfläche der Basalmembran haften. Die Trennung von Dermis und Epidermis erfolgte also in oder dicht oberhalb der Basalmembran.

Die lichtmikroskopische Voruntersuchung erfolgte an einigen Kontrollproben der mit Kunststoff injizierten Klauen. Die Überprüfung des Injektionsgrades der zentralen Lamellen- und Papillengefäße ermöglichte die Sicherstellung, dass die meisten Gefäße bis in den subapikalen Bereich mit Kunststoff gefüllt waren.

## **2.3 Die Form der dermalen Oberflächenmodifikationen im Wandsegment**

Die dermalen Oberflächenmodifikationen sind im Wandsegment in Form von proximodistal orientierten Lederhautblättchen (Abb. 10 b) ausgebildet. Am Zehenrücken der lateralen Klaue haben die Lederhautblättchen des Wandsegmentes eine proximodistale Ausdehnung von 4,4 cm, an der medialen Klaue liegt die proximodistale Ausdehnung bei 3,9 cm. Im Grenzbereich vom Kron- zum Wandsegment entspringen proximale Kappenpapillen auf niedrigen, parallel angeordneten Lederhautleisten. Diese Basisleisten streben in proximodistaler Richtung und gehen kontinuierlich in die Lederhautblättchen des Wandsegmentes über. Die proximalen Kappenpapillen haben eine fadenförmige Gestalt mit einer maximalen Länge von 300 µm. Ihr Durchmesser beträgt 35 bis 45 µm an der Basis und verjüngt sich im subapikalen Bereich auf 8 bis 15 µm. Distal verliert sich schnell ihre schlanke Gestalt, und sie treten in einem Abstand von 24 µm aus den Firsten der Blättchen hervor und laufen ab einer Höhe von 40 bis 60 µm kegelförmig zu. Die proximalen Kappenpapillen gehen in einem Winkel von 35 bis 50° aus der Lederhautunterlage hervor und streben gerade und parallel zur Klauenoberfläche distal. Den Abschluss bilden proximale Kappenpapillen, die in Form von leistenartigen



Erhebungen aus den Firsten der Lederhautblättchen hervortreten und eine Höhe von 20  $\mu\text{m}$  erreichen (Abb. 10 a). Auf der Oberfläche der Kappenpapillen erscheinen im Abstand von 3 bis 5  $\mu\text{m}$  Mikroleisten mit einer Höhe von bis zu 7  $\mu\text{m}$ , die in Längsrichtung der Papille ausgerichtet sind und schon im apikalen Drittel der proximalen Kappenpapillen verstreichen. Die Lederhautblättchen ziehen mit einer zunehmenden Schlängelung von der Kron-Wand-Grenze zur Wand-Sohlen-Grenze. Die Höhe der Blättchen nimmt ebenfalls in proximodistaler Richtung zu. Im proximalen Bereich des Wandsegmentes beträgt ihre Höhe nur 1 mm, die sich kontinuierlich bis auf 2,5 mm im distalen Drittel vergrößert. Im mittleren Bereich des Wandsegmentes gabeln sich einige Lederhautblättchen in zwei bis drei Blättchen. Die abgebildeten Blättchen gehen aus der Flanke eines Blättchens hervor und ziehen bei gleicher Form und annähernd gleicher Höhe distal (Abb. 10 c). Im Bereich des Zehenrückens sowie der abaxialen Wandfläche steigt die Anzahl der Lederhautblättchen um den Faktor 1,5 in proximodistaler Richtung bis zur Wand-Sohlen-Grenze. Im distalen Drittel des Wandsegmentes gehen wiederum Kappenpapillen aus den Firsten der Blättchen hervor. Sie sind 100  $\mu\text{m}$  und weiter distal bis zu 700  $\mu\text{m}$  lang und von fadenförmiger Gestalt (Abb. 10 d). Ihre Längsachse weist wie die der proximalen Kappenpapillen distal. Die Anzahl der distalen Kappenpapillen nimmt in proximodistaler Richtung immer mehr zu. Sie treten in einem Abstand von 100  $\mu\text{m}$  und weiter distal in kürzeren Abständen von 6  $\mu\text{m}$  aus den Firsten der Lederhautblättchen hervor. Ihr Durchmesser beträgt 40 bis 60  $\mu\text{m}$  an der Basis, der sich im subapikalen Bereich bis auf 20  $\mu\text{m}$  verjüngt, bevor die Papille abgerundet endet. An der Wand-Sohlen-Grenze wird die Reihe der distalen Kappenpapillen durch Terminalpapillen fortgesetzt (Abb. 10 d), die die geradlinige Fortsetzung der distalen Enden der Lederhautblättchen bilden. Der Verbund von Terminalpapillen wird sohlenwärts unter Gestaltänderung von Lederhautpapillen der Sohle fortgesetzt. Die Terminalpapillen stehen oftmals in Gruppen mit unterschiedlicher Länge. Die zentral stehende Hauptpapille erreicht eine Höhe von 800  $\mu\text{m}$  mit einem Durchmesser von bis zu 300  $\mu\text{m}$  an der Basis, der sich bis zur Papillenspitze auf 20 bis 30  $\mu\text{m}$  verringert. Die um die Hauptpapille formierten Nebenpapillen (Abb. 11 b) sind ebenfalls von fadenförmiger Gestalt, erreichen aber nicht die gleiche Länge wie diese. Im basalen Bereich der Hauptpapillen finden sich oftmals warzenförmige Papillenäste (Abb. 11 d). Überdies stehen auch mehrere Hauptpapillen eng zusammen. Die Oberfläche der Papillen ist durch eine Kannelierung und Mikroleisten vergrößert. Die rinnenförmigen Einkehlungen sind in regelmäßigen Abständen von 10 bis 15  $\mu\text{m}$  zu beobachten und verstreichen im oberen Drittel der Papillen (Abb. 11 c). Die gesamte Oberfläche der Papillen ist mit 2 bis 4  $\mu\text{m}$  langen und 0,3 bis 2  $\mu\text{m}$  breiten Mikroleisten besetzt, die längs zur Papille angeordnet sind (Abb. 11 e).

## 2.4 Die dermoepidermale Grenzfläche des Wandsegmentes

Die Trennung von Wandlederhaut und Wandepidermis erfolgte in oder im unmittelbaren Bereich über der Basalmembran. Die Architektur der dermoepidermalen Grenzfläche entspricht dem Oberflächenrelief der Lederhaut und wird somit durch kongruente Strukturen gekennzeichnet. Das Erscheinungsbild der dermoepidermalen Grenzfläche ist im Wandsegment durch einen regelmäßigen Wechsel von Stegen und spaltartigen Vertiefungen charakterisiert (Abb. 12 b). Die Epidermisstege stehen in proximodistal orientierten Reihen. Im proximalen Bereich des Wandsegmentes haben die Epidermisstege eine gleichmäßige Breite von 10 bis 15  $\mu\text{m}$  und ihre Oberfläche ist meist glatt. Die Stege stehen in gleichmäßigen Abständen von 100 bis 150  $\mu\text{m}$ . Die spaltartigen Vertiefungen beherbergen wiederum epidermale Invaginationen, die Öffnungen für die proximalen Kappenpapillen darstellen (Abb. 12 a). Diese Öffnungen sind meist von ovaler Form und 40 bis 50  $\mu\text{m}$  breit. Daneben finden sich auch rundliche Öffnungen von geringerem Durchmesser. Im proximalen Bereich des Wandsegmentes sind die Öffnungen für die dermalen Kappenpapillen durch dünne Septen voneinander getrennt, die eine Breite von 30  $\mu\text{m}$  haben. Der mittlere Bereich der Wandepidermis ist durch den regelmäßigen Wechsel von linear angeordneten Epidermisstegen und spaltartigen Vertiefungen gekennzeichnet. Ein Epidermissteg spaltet sich in zwei bis drei nahezu parallel verlaufende Stege. Die Epidermisstege, die proximal noch glatt sind (Abb. 12 b), weisen distal zunehmend furchenartige Vertiefungen auf (Abb. 12 c).

Am Beginn des distalen Bereiches des Wandsegmentes bilden ovale Öffnungen das Pendant für die dermalen, distalen Kappenpapillen mit einem Durchmesser von 70 bis 100  $\mu\text{m}$  (Abb. 12 c). Weiter distal treten immer häufiger auch runde Öffnungen mit zunehmendem Durchmesser in Erscheinung. Kleinere runde epidermale Öffnungen sind für lange dermale Kappenpapillen ausgebildet, während weiter distal, runde Öffnungen mit einem Durchmesser von bis zu 250  $\mu\text{m}$  Gruppen von Terminalpapillen aufnehmen (Abb. 12 d). Neben den Vertiefungen für die dermalen Wandblättchen finden sich zwischen den Öffnungen für die terminalen Hauptpapillen kleinere längsovale Öffnungen mit einem Durchmesser von 80  $\mu\text{m}$  für die dermalen Nebenpapillen. Diese in Reihen angeordneten Öffnungen der terminalen Epidermisröhrchen nehmen distal immer mehr an Breite zu, bis sie fast rund erscheinen. Die Formation der trichterförmigen Rundungen der Terminalröhrchen wird dadurch noch hervorgehoben, dass dünne Septen die einzelnen Epidermisstege miteinander verbinden. Vereinzelt sind an der Basis der terminalen Hauptröhrchen kleine Öffnungen erkennbar, die das Pendant zu den Nebenpapillen darstellen. Weiterhin finden sich am Rand der Hauptröhrchen kleine Öffnun-

gen als Äquivalent für die Sekundärpapillen, die aus dem basalen Bereich der dermalen Hauptpapillen hervorgehen.

## 2.5 Die Form der dermalen Oberflächenmodifikationen im Sohlensegment

An der Wand-Sohlen-Grenze gehen die Lederhautblättchen kontinuierlich in niedrige Lederhautleisten des Sohlensegmentes über. Diese Lederhautleisten stehen an der Klauenspitze sehr dicht und sind parallel zueinander angeordnet. Im abaxialen sowie axialen Sohlenschenkel sind die Leisten palmar/plantar orientiert. In dem Bereich der Sohlenschenkel stehen die Lederhautleisten wesentlich enger als im halbmondförmigen Sohlenkörper an der Klauenspitze. Diese leistenartigen Erhebungen erreichen eine Höhe von 100  $\mu\text{m}$  und einen Durchmesser von 10 bis 20  $\mu\text{m}$  an ihrer Basis. Besonders im Bereich des abaxialen und axialen Sohlenschenkels treten haifischflossenartige Lederhauterhebungen an den Seitenflächen der Lederhautleisten mit einer Höhe von 20 bis 40  $\mu\text{m}$  und einem Durchmesser von 10 bis 20  $\mu\text{m}$  in Erscheinung. Die Oberfläche dieser interpapillären Erhebungen besitzt einen gezackten Rand. Der Papillarkörper des Sohlensegmentes ist in Form von Lederhautpapillen ausgebildet, die wiederum aus den Lederhautleisten hervorgehen. Ihre Gestalt variiert von langen schlanken bis zu kegelförmigen Papillen. Ihre Länge erstreckt sich bis zu 700  $\mu\text{m}$ , wobei die längsten Papillen in der Nähe des Tragrandes stehen. Ihr Durchmesser misst an der Basis 100 bis 200  $\mu\text{m}$ , der sich im subapikalen Bereich bei einem rundlichen Querschnitt bis auf 20  $\mu\text{m}$  verjüngt. Die Lederhautpapillen entspringen in einem Neigungswinkel von 45 bis 60° aus den Lederhautleisten, verlaufen bogenförmig und streben in Richtung Klauenspitze. Neben den beschriebenen Hauptpapillen finden sich auch stummel- bis fadenförmige Nebenpapillen, die ebenfalls aus den Lederhautleisten hervorgehen, aber nur eine maximale Länge von 400  $\mu\text{m}$  erreichen (Abb. 18 d). Sie besitzen einen Durchmesser von 60 bis 80  $\mu\text{m}$  an der Basis, der sich bis in den subapikalen Bereich auf 30 bis 40  $\mu\text{m}$  verjüngt. Vereinzelt auftretende, kegelförmige Papillen entspringen an der gemeinsamen Basis mit den Hauptpapillen. Sie erreichen eine Höhe von 50 bis 150  $\mu\text{m}$  mit einem Durchmesser von 10 bis 30  $\mu\text{m}$  an der Basis und sind gelegentlich ringförmig um die Hauptpapille angeordnet. Diese Formation tritt vor allem im Sohlenkörper auf. Die Oberfläche der Papillen weist in regelmäßigen Abständen rinnenförmige, parallel zur Längsachse der Papillen angeordnete Einkehlungen auf, die bis zu 10  $\mu\text{m}$  breit und bis zu 30  $\mu\text{m}$  tief sind. Diese Kannelierung läuft bei den meisten Papillen erst im subapikalen Bereich aus, bei wenigen reicht sie nur bis zur oberen Drittelgrenze. Weitere Formen der Oberflächenvergrößerung an den Lederhautpapillen sind Mikroleisten. Diese Lederhautleistchen, die im Abstand von 0,5 bis 2  $\mu\text{m}$  parallel zur Längsachse der Papille ange-

ordnet sind, erreichen eine Höhe von 2 bis 4  $\mu\text{m}$  und eine Breite von 0,5 bis 1  $\mu\text{m}$ . Neben den längs verlaufenden Mikroleisten finden sich auch quer verlaufende, die eine Höhe von 1  $\mu\text{m}$  erreichen. Durch die verschieden gerichteten Mikroleisten ist die Oberflächenkontur der Papillen zunehmend netzartig.

## **2.6 Die Epidermisformation des Sohlensegmentes**

Der Übergang der terminalen Epidermis des Wandsegmentes in das Sohlensegment ist einerseits durch das Auslaufen vom Firstbereich der Epidermisblättchen gekennzeichnet und andererseits durch den geringeren Durchmesser der Sohlenröhrchen gegenüber dem der dickeren Terminalröhrchen. Die Sohlenröhrchen sind in Reihen angeordnet, die in den meisten Fällen nur durch schmale Epidermisstege voneinander getrennt werden. Die epidermalen Invaginationen sind von ovaler bis runder Gestalt. Neben den ovalen Öffnungen der Hauptröhrchen sind zahlreiche runde Öffnungen der Nebenröhrchen ausgebildet. Der Zugang zur Öffnung der Hauptröhrchen variiert von 150 bis 200  $\mu\text{m}$ , während die Öffnungen der Nebenröhrchen einen Durchmesser von 60  $\mu\text{m}$  besitzen. Stellenweise finden sich an der Basis des Hauptröhrchens kleine Öffnungen für dermale Sekundärpapillen. An der basalen Epidermisgrenzfläche sind kleine Furchen erkennbar, die das Pendant zu den leistenartigen gezackten Lederhauerhebungen bilden.

## **3. Ergebnisse der lichtmikroskopischen Untersuchungen des unbelasteten Klauenbeinträgers**

### **3.1 Der bindegewebige, vornehmlich dermale Teil des Klauenbeinträgers im Wandsegment**

Der bindegewebige Teil des Klauenbeinträgers inseriert über eine chondroapophysäre Insertionszone an der Wandfläche des Klauenbeines. Diese vierzonale Insertionszone des Klauenbeinträgers gliedert sich in die folgenden Zonen:

- 1. Zone des lamellären Knochens**
- 2. Zone des verkalkten Faserknorpels**
- 3. Zone des unverkalkten Faserknorpels**
- 4. Zone des parallelfaserigen straffen Bindegewebes**

Die untersuchten Probenareale des Zehenrückens und der abaxialen sowie axialen Wandfläche werden in einen proximalen, mittleren und distalen Wandbereich gegliedert. Als weiterer

Bereich wird der Margo solearis gewählt. Diese Einteilung dient der Erfassung der strukturellen Elemente des Klauenbeinträgers in den einzelnen Bereichen des Wandsegmentes. Eine chondroapophysäre Ansatzzone ist nur in den mittleren und distalen Bereichen des Wandsegmentes sowie am Klauenbeinrand anzutreffen, während sie im proximalen Bereich des Wandsegmentes fehlt.

### 3.1.1 Die Zone des lamellären Knochens

Die untersuchten Wandflächen des Klauenbeines weisen in den meisten Bereichen eine durch Knochenleisten verursachte, unebene Oberflächenstruktur auf, die durch Gefäßkanälchen regelmäßig unterbrochen wird. Die parallel angeordneten Knochenleisten verlaufen auf der abaxialen sowie axialen Wandfläche klauenbeinspitzenwärts. Ausgenommen von diesem Bild der vorwiegend leistenartigen Oberflächenformation ist der Zehenrückbereich des Klauenbeines, der vorwiegend ein wabenartiges Muster aufweist (Abb. 2 e).

In den Bereichen der Wandfläche mit einer leistenartigen Klauenbeinoberfläche inserieren die kollagenen Faserbündel des Klauenbeinträgers vornehmlich auf den Firsten der Knochenleisten (Abb. 4 d). Sind diese Leisten nur von geringer Höhe, so werden auch die Vertiefungen zwischen den Knochenleisten vollständig von der faserknorpeligen Ansatzzone bedeckt. Ein Periost liegt nur dort vor, wo die faserknorpelige Ansatzzone des Klauenbeinträgers fehlt. Sind die Knochenleisten hoch und stehen eng nebeneinander, inserieren die kollagenen Faserbündel am First und an den Flanken der Knochenleisten und die Vertiefungen bieten Raum für lockeres zellreiches Bindegewebe sowie Gefäße (Abb. 5 e). Als kollagenfaserige Knochenauflage besteht das Periost aus ellipsenförmigen Bindegewebszellen (*Stratum fibrosum*) respektive Vorläuferzellen der Osteoblasten (*Stratum osteogenicum*) und ist von lockerem Bindegewebe und Gefäßen umgeben. Die Grenze vom lamellärem Knochen zur Zone des verkalkten Faserknorpels wird durch eine osteochondrale Grenzlinie deutlich. Sie stellt sich als eine gleichmäßig schmale Grenzlinie dar (Abb. 4 e). Ein Teil der Kollagenfasern des Klauenbeinträgers inseriert an der osteochondralen Grenzlinie, während der größere Anteil der Kollagenfasern die Grenzlinie durchzieht und sich an den äußeren Speziallamellen der Randosteone verankert, die sich an der Oberfläche des Klauenbeines befinden (Abb. 4 e). Zentralwärts schließen sich größere, querovale Osteone mit weitem Haversschen Kanal an.

### 3.1.2 Die Zone des verkalkten Faserknorpels

Die unterschiedliche Dicke der Zone des verkalkten Faserknorpels ist einerseits durch die unregelmäßig zerklüftete Oberflächenstruktur des Klauenbeines bedingt und andererseits

durch die Stärke der Kollagenfaserbündel. Im mittleren Bereich des Wandsegmentes erreicht die Zone des verkalkten Faserknorpels am Zehenrücken und der abaxialen Wandfläche nur eine Dicke von durchschnittlich 77  $\mu\text{m}$ , die sich bis zum Klauenbeinrand auf einen durchschnittlichen Wert von 104  $\mu\text{m}$  erhöht. Die Zone des verkalkten Faserknorpels weist bei den Dickenmessungen eine Variabilität von 6 bis 333  $\mu\text{m}$  auf.

Im distalen Bereich der axialen Wandfläche besitzt die Zone des verkalkten Faserknorpels nur eine Dicke von 58  $\mu\text{m}$ , die sich am Klauenbeinrand auf 87  $\mu\text{m}$  erhöht. Je höher die einwirkende Zugbelastung ist, desto stärker sind die kollagenen Faserbündel und desto dicker ist die Zone des verkalkten Faserknorpels ausgebildet. Ziehen dicht aggregierte Kollagenfasern in feinen Bündeln durch diese Zone, dann ist sie schmaler, verbunden mit einem zunehmenden Anteil an Zonen des zell- und gefäßreichen lockeren Bindegewebes wie im mittleren Bereich des Wandsegmentes. Diese Zonen flankieren die Zonen des parallelfaserigen straffen Bindegewebes und markieren Areale, die frei sind von einer faserknorpeligen Ansatzzone.

Im distalen Bereich des Wandsegmentes finden sich vorwiegend dicht aggregierte Kollagenfasern in derben Bündeln, die geradlinig durch die Ansatzzone ziehen, verbunden mit einer dickeren Zone des verkalkten Faserknorpels (Abb. 5 e). Eine Ausnahme bilden die Klauenbeinspitze im Zehenrückenbereich und der abaxiale und axiale Klauenbeinrand. Obwohl die kollagenen Faserzüge der Zone des parallelfaserigen straffen Bindegewebes am Klauenbeinrand dünner sind, strahlen sie fächerförmig durch eine relativ dicke Zone des verkalkten und unverkalkten Faserknorpels bis in das Stratum lamellatum der Lederhautblättchen hinein (Abb. 8 c). Die Stärke der Kollagenfaserbündel korreliert mit einer zunehmenden Anzahl chondroider Zellen in den Faserknorpelzonen. Strahlen dicht aggregierte Kollagenfasern nur in dünnen Bündeln in die Zone des verkalkten Faserknorpels ein, dann sind wenige chondroide Zellen anzutreffen, die die PAS- und Alcianblau-Reaktion nur schwach beantworten. An Lokalisationen, an denen jedoch dicht aggregierte Kollagenfasern in starken Bündeln durch die Zone des verkalkten Faserknorpels ziehen, zeigen sich viele PAS- und Alcianblau-positiv reagierende, chondroide Zellen und markieren einen Bereich mit einer hohen Stoffwechselaktivität. Die territoriale Anordnung der chondroiden Zellen reicht von einer gleichmäßigen Verteilung in der Nähe der osteochondralen Grenze bis zu einer gruppenartigen Ansammlung an der Tidemark. Die chondroiden Zellen sind von spindelförmiger bis runder Form. Spindelförmige chondroide Zellen finden sich der Tidemark benachbart und sind mit ihrer Längsachse in Faserverlaufsrichtung orientiert; runde Zellen sind bevorzugt in der Nähe der osteochondralen Grenzlinie zu erkennen (Abb. 5 e). Ein dünner basophiler Saum lagert sich als Knorpelzellkapsel um die chondroiden Zellen, ebenso deutlich ist ein Knorpelzellhof zu er-

kennen. Die perizelluläre Knorpelzellkapsel, die der osteochondralen Grenze benachbart ist, nimmt an Umfang zu. In ihrer Knorpelzellhöhle wird feinkörniges Material deutlich sichtbar. Der Zellkern der chondroiden Zelle erscheint oval bis rund und enthält mehrere Nukleoli sowie stark angefärbtes Heterochromatin. Das feingranuläre Zytoplasma ist deutlich heller als der Zellkern. Der eher ovale Zellkern der chondroiden Zelle, die unweit der Tidemark liegt, ist basophil und heterochromatisch mit einem deutlichen Nukleolus. Die Interzellulärsubstanz ist um die chondroiden Zellen und in der Nähe der Tidemark mit neutralen und sauren Mukosubstanzen angereichert.

Die chondroapophysäre Ansatzzone des Klauenbeinträgers stellt am Margo solearis eine Sonderform dar, mit Anzeichen der höchsten mechanischen Beanspruchung. Die sehr dicke faserknorpelige Zone lässt zahlreiche chondroide Zellen und unmaskierte Kollagenfasern erkennen, die verglichen mit den anderen Bereichen des Wandsegmentes die höchste Konzentration an Kollagenfasern vom Typ III sowie neutralen und sauren Mukopolysacchariden aufweist. Die intensive Proteinbiosynthese in den chondroiden Zellen ist ein Zeichen der Anpassung an die hohe Belastung am Margo solearis. Der abgerundete und euchromatische Zellkern der chondroiden Zellen enthält bis zu drei gut entwickelte Nukleoli. In der Nähe der Tidemark finden sich zahlreiche Chondrone aus zwei Knorpelzellen. Nahe der osteochondralen Grenzlinie werden die chondroiden Zellen von einer großen Menge Interzellulärsubstanz umgeben, die auf diese Weise eine gruppenartige Ansammlung verhindert.

Der Übergang von der Zone des verkalkten zum unverkalkten Faserknorpel wird durch eine stark basophile Grenzlinie, die Mineralisationszone respektive Tidemark, markiert. Sie folgt der Oberflächenkontur des Klauenbeines im Abstand der verkalkten Faserknorpelzone (Abb. 5 a). Die Tidemark zeigt sich als PAS- und Alcianblau-positiv, was für das Vorkommen von neutralen sowie sauren Mukopolysacchariden spricht. Die Dicke der Mineralisationszone ist abhängig von der Stärke der durchziehenden Kollagenfaserbündel. Je feiner die Kollagenfaserbündel des Klauenbeinträgers sind, um so schmaler und gleichmäßiger tritt die Mineralisationsbarriere in Erscheinung. Dies trifft auf den gesamten mittleren Bereich des Wandsegmentes zu (Abb. 5 b). Passieren dicht aggregierte Kollagenfasern in kräftigen Bündeln die Tidemark, dann ist die Mineralisationszone dicker und von ausgeprägter Basophilie, wie im distalen Bereich des Wandsegmentes. Eine Ausnahme bildet wiederum der Margo solearis, wo dicht aggregierte Kollagenfasern in feinen Bündeln fächerförmig eine relativ dicke Tidemark durchkreuzen. Dort, wo lockeres Bindegewebe die Kollagenfasern flankiert, kann die Tidemark als Bestandteil der vierzonalen Ansatzzone mitunter auch fehlen. Die unregelmäßige Dicke der Tidemark kommt durch ihre zackenförmige Linienzeichnung zustan-

de, wobei die zackenartigen Ausläufer vornehmlich in die Zone des unverkalkten Faserknorpels hineinragen. Eine stärkere Ausprägung dieser zackenartigen Ausläufer erscheint in proximodistaler Richtung, verbunden mit einer Dickenzunahme der Mineralisationszone. Im mittleren Bereich des Wandsegmentes ist die Tidemark durchschnittlich 6  $\mu\text{m}$  dick. Am Margo solaris erhöht sich ihre Dicke auf 9,23  $\mu\text{m}$ . Die Minimal- und Maximalwerte für die Dicke der Mineralisationszone reichen von 2,5 bis zu 31  $\mu\text{m}$  im distalen Bereich des Wandsegmentes. Ebenso wie die Stärke der einstrahlenden Kollagenfaserbündel wird das Erscheinungsbild der Tidemark auch von der Oberflächenkontur des Klauenbeines geprägt. Die Tidemark liegt den Firsten der Knochenlamellen kappenartig auf, wodurch eine Wellenform erkennbar ist (Abb. 5 b). Im mittleren Bereich des Wandsegmentes lagern sich bis zu fünf Mineralisationszonen kappenartig übereinander. Ist dies der Fall, so ist die äußere Mineralisationszone am breitesten und farbintensivsten (Abb. 5 c). Liegen die Mineralisationszonen geschichtet übereinander ohne sich zu vereinigen, so ist die der Klauenbeinoberfläche am nächsten gelegene Tidemark am dicksten und intensivsten koloriert. In proximodistaler Richtung nimmt die Anzahl übereinander gelagerter Mineralisationszonen ab. Finden sich noch bis zu fünf Zonen im mittleren Bereich des Wandsegmentes, so sind es distal maximal noch drei Mineralisationszonen. Im distalen Bereich des Wandsegmentes und am gesamten Klauenbeinrand korreliert die Anzahl der kappenförmig übereinander liegenden Mineralisationszonen mit dem zunehmenden Abstand von der ersten bis zur letzten Tidemark respektive mit der damit verbundenen Vergrößerung der Zone des verkalkten Faserknorpels (Abb. 5 e).

### 3.1.3 Die Zone des unverkalkten Faserknorpels

Die Dicke der Zone des unverkalkten Faserknorpels nimmt proximodistal zu. Diese Gegebenheit korreliert mit der zunehmenden Stärke der dicht aggregierten kollagenen Faserbündel, die in die Zone des unverkalkten Faserknorpels einstrahlen. Im mittleren Bereich des Wandsegmentes finden sich dicht aggregierte Kollagenfasern in dünnen Bündeln und die Zone des unverkalkten Faserknorpels präsentiert sich nur als dünner eosinophiler Saum mit wenigen chondroiden Zellen (Abb. 5 b). Im mittleren Bereich des Wandsegmentes ist die Zone des unverkalkten Faserknorpels am Zehenrücken 30  $\mu\text{m}$  dick und abaxial durchschnittlich 34  $\mu\text{m}$ . Die chondroiden Zellen sind mit ihrer Längsachse in Richtung des kollagenen Faserverlaufs orientiert und zeigen sich in einer ovalen bis runden Gestalt mit einer dünnen Knorpelzellkapsel (Abb. 5 a). Der ovale Zellkern ist basophil und besitzt einen deutlichen Nukleolus. Im distalen Bereich des Wandsegmentes liegt die Dicke der unverkalkten Faserknorpelzone bei 52  $\mu\text{m}$  im Zehenrückenbereich und bei 60  $\mu\text{m}$  an der abaxialen Wandfläche. Am gesamten



Klauenbeinrand wird ein unruhiges Bild einerseits durch die leistenartige Kontur der Klauenbeinoberfläche verursacht und andererseits durch die Anwesenheit von vielen fächerförmig dicht aggregierten Kollagenfasern in dünnen Bündeln. Die Zone des unverkalkten Faserknorpels ist mit 65 µm doppelt so dick wie im mittleren Bereich des Wandsegmentes. Chondroide Zellen sind am Klauenbeinrand mit ihrer Längsachse in Faserverlaufsrichtung orientiert. Charakteristisch für diesen Bereich ist der höhere Gehalt an sauren und neutralen Mukopolysacchariden und das vermehrte Vorkommen von chondroiden Zellen.

Der Übergang von der Zone des unverkalkten Faserknorpels zur Zone des parallelfaserigen straffen Bindegewebes ist stellenweise fließend (Abb. 5 e). Er wird durch eine verminderte Maskierung der kollagenen Fasern und durch einen niedrigen Gehalt an sauren Mukopolysacchariden in der Zone des parallelfaserigen straffen Bindegewebes verdeutlicht. In Annäherung an die Zone des parallelfaserigen straffen Bindegewebes ist das Vorkommen von elastischen Fasern möglich und die Bindegewebszellen nehmen die Gestalt von Fibrozyten an. Weiterhin sind die kollagenen Fasern in der faserknorpeligen Ansatzzone weniger gewellt und inserieren nach einem geradlinigen Verlauf an der Zone des lamellären Knochens.

#### **3.1.4 Die Zone des parallelfaserigen straffen Bindegewebes**

Dicht aggregierte Kollagenfasern ziehen in parallelen Bündeln unterschiedlicher Stärke durch die Ansatzzone an die Klauenbeinoberfläche, ohne ihre Linearität zu verlieren (Abb. 5 d). Die Kollagenfasern nehmen im unbelasteten Zustand der Klaue einen leicht gewellten Verlauf. Je dichter sich die Kollagenfaserbündel aneinander reihen, desto geringer wird der Anteil an Interzellulärsubstanz, der sich in der Nähe der faserknorpeligen Insertionszone intensiver koloriert. In Annäherung an die Faserknorpelzone ist eine Zunahme von Bindegewebszellen zu vermerken, die einen schmalen eosinophilen Zytoplasmasaum aufweisen. Die Fibrozyten zeigen eine spindelförmige Gestalt mit zentral gelegenem, länglichem Zellkern, der gleichmäßig mit Heterochromatin angefüllt ist. Die Fibrozyten sind reihenförmig und in Faserverlaufsrichtung orientiert (Abb. 5 a).

Die strukturelle und funktionelle Einheit des dermalen Teils des Klauenbeinträgers wird durch das Fasersystem gebildet und in den Zonen des parallelfaserigen straffen Bindegewebes dargestellt. Die kollagenen, elastischen und retikulären Fasern prägen als Anteil der geformten Interzellulärsubstanz ein der Funktionalität entsprechendes Bild. Unterschiede bestehen in der Quantität und Qualität der Fasern sowie in deren Anordnung. Bindegewebsfasern verankern den dermalen Anteil des Klauenbeinträgers einerseits über die vierzonale Ansatzzone an der

Klauenbeinoberfläche, und andererseits nehmen sie Kontakt zum dermoepidermalen Grenzbe-  
reich auf (Abb. 3).

Dicht aggregierte Kollagenfasern ziehen in einem parallel gerichteten Verbund und in einem  
bestimmten Richtungswinkel von der Klauenbeinoberfläche bis in die Lederhautblättchen  
hinein (Abb. 3). Im proximalen Bereich des Wandsegmentes, dem Übergangsbereich vom  
Kron- ins Wandsegment, zeigt sich ein faserreiches geflechtartiges Bindegewebe ohne spe-  
zielle Verlaufsrichtung, somit fungiert dieser proximale Bereich des Wandsegmentes nicht als  
Anteil des Klauenbeinträgers. Bei proximodistaler Betrachtung des Wandsegmentes wird  
deutlich, dass sich die parallel verlaufenden Kollagenfasern distal immer mehr zu breiteren  
Bündeln zusammenschließen, um in dicht aggregierten Kollagenfaserzügen die faserknorpeli-  
ge Ansatzzone zu durchsetzen und am Klauenbein zu inserieren (Abb. 5 d). Die Funktion des  
Klauenbeinträgers wird folglich von den kollagenen Bindegewebsfasern im middle-  
ren (Abb. 8 a) und distalen (Abb. 8 b) Bereich des Wandsegmentes bis zum Klauenbeinrand  
übernommen. An der Klauenbeinspitze und der abaxialen Wandfläche ziehen dicht aggregier-  
te Kollagenfaserbündel in feinen Bündeln fächerförmig von der Oberfläche des Klauenbeines  
bis zur dermoepidermalen Grenzfläche (Abb. 8 c). Verstärkt werden sie durch Kollagenfaser-  
züge, die ihren Ursprung an der sohlenseitigen Klauenbeinoberfläche haben und sich in Rich-  
tung des Tragrandes erstrecken. Kurz vor Erreichen der Basis der Lederhautblättchen tau-  
schen die einzelnen Kollagenfaserbündel untereinander Faserzüge aus, bevor sie in die Leder-  
hautblättchen hineinziehen. So verteilen sich Kollagenfasern eines einzelnen, an der Klauen-  
beinoberfläche inserierenden Faserbündels, auf zwei bis vier Lederhautblättchen und verteilen  
die Zugkräfte an der dermoepidermalen Grenzfläche auf eine größere Fläche (Abb. 9 b). In-  
nerhalb des Lederhautblättchens enden Kollagenfasern am dermoepidermalen Grenzbe-  
reich, so dass der Durchmesser der Lederhautblättchen von der Basis bis zu ihrem First kontinuier-  
lich abnimmt. Zentral im Lederhautblättchen verlaufen Gefäße, die von Nerven begleitet wer-  
den. Zwischen den Kollagenfasern liegen in Reihen angeordnete Fibrozyten, deren Längsach-  
se in Zugrichtung des Klauenbeinträgers ausgerichtet ist.

Die elastischen Fasern sind verzweigt und bilden feine Netzwerke. Eine quantitative Zunahme  
der elastischen Fasern ist vom Klauenbein in Richtung der Lederhautblättchen festzustellen,  
sowie in proximodistaler Richtung des Wandsegmentes. Es finden sich besonders hohe Kon-  
zentrationen elastischer Fasernetze an der Basis der Lederhautblättchen im distalen Bereich  
des Wandsegmentes (Abb. 9 c). Die elastischen Fasern sind trajektorieell in Zugrichtung des  
Klauenbeinträgers ausgerichtet. Sie bilden ein subepidermales Netzwerk und unterstützen die  
federnd-dämpfende Zugübertragung. In der faserknorpeligen Zone des Klauenbeinträgers sind

keine elastischen Fasern zu erkennen, vielmehr erst bei Annäherung an die Basis der Lederhautblättchen in der Zone des zell- und gefäßreichen lockeren Bindegewebes.

Die PAS-Reaktion nach McMANUS stellt retikuläre Fasern purpurrot dar. Im lockeren Bindegewebe begleiten sie kollagene Fasern vom Typ I vom Klauenbein bis in den First der Lederhautblättchen. Retikuläre Fasern verdichten sich besonders im apikalen Bereich der Lederhautblättchen und begleiten die Blutgefäße als engmaschiges Netzwerk. Retikuläre Fasern lagern sich an die dermoepidermale Grenzfläche und folgen der Kontur der Basalzellen (Abb. 9 d). Sie formieren durch ihre enge Verflechtung die Lamina fibroreticularis der Basalmembran.

Mit der PAS-Reaktion nach McMANUS werden neutrale Mukosubstanzen/Mukopolysaccharide und das Polysaccharid Glykogen als Bestandteile der ungeformten Interzellulärsubstanz semiquantitativ nachgewiesen. Besonders intensiv reagieren chondroide Zellen, die in der Nähe der Tidemark liegen, sowie die Grundsubstanz zwischen diesen Zellen und der Tidemark als auch die Mineralisationsbarriere selber. Betont werden auch die osteochondrale Grenzfläche sowie die Basalmembran an der dermoepidermalen Grenzfläche. Das retikuläre Fasersystem wird ebenfalls durch die PAS-Reaktion dargestellt. Die sauren Mukosubstanzen/Mukopolysaccharide werden mit Alcianblau bei einem pH von 2,5 nachgewiesen. Die Mukosubstanzen sind bis auf die Tidemark relativ gleichmäßig verteilt. In der Tidemark ist der Gehalt an sauren Mukopolysacchariden gering. Eine tendenzielle Zunahme der Farbtintensität findet sich an der Basis der Lederhautblättchen, besonders im distalen Bereich des Wandsegmentes. Bei der weiteren Differenzierung der sauren Mukosubstanzen zur Unterscheidung sulfatierter von nicht-sulfatierten Mukopolysacchariden durch Alcianblau bei einem pH von 1,0 ergeben sich keine Unterschiede im Konzentrationsgefälle, bis auf eine allgemein schwächere Farbtintensität.

Die Zone des parallelfaserigen straffen Bindegewebes wird jeweils von Zonen des zell- und gefäßreichen lockeren Bindegewebes flankiert (Abb. 5 d). Die Zone des parallelfaserigen straffen Bindegewebes stellt die funktionelle Komponente des Klauenbeinträgers im mechanischen Sinne dar und leitet die Zugkräfte an den epidermalen Teil des Klauenbeinträgers federnd-elastisch weiter. Die Zonen des zell- und gefäßreichen lockeren Bindegewebes stellen ebenfalls einen modifizierten Teil der Dermis dar und sorgen für die Ernährung einerseits der Zonen des parallelfaserigen straffen Bindegewebes und andererseits für die avaskuläre Epidermis. Des Weiteren ermöglichen die verschiedenen Komponenten dieser Zonen durch die Übermittlung von Botenstoffen eine enge dermoepidermale Koordination. Die Blutgefäße und Nerven werden von lockerem Bindegewebe begleitet, wobei größere Gefäße und ein dichtes

Netz aus Arteriolen und Venulen in Annäherung an die Basis der Lederhautblättchen anzutreffen sind, die das subepidermale Kapillarnetz speisen respektive drainieren. Die Zonen des gefäßreichen lockeren Bindegewebes werden proximodistal des Wandsegmentes schmaler (Abb. 8 c), insbesondere auf der abaxialen Wandfläche.

### **3.1.5 Die Form und Ausrichtung der Lederhaut- und Epidermisblättchen**

Kenntnisse über die strukturelle Beschaffenheit der Lederhautmodifikation im Wandsegment als Äquivalent zum epidermalen Anteil sind Voraussetzung für das Verständnis ihrer funktionellen Bedeutung und wiederum ihrer Wechselwirkung mit weiteren Elementen des Klauenbeinträgers. Im Folgenden werden Informationen über die Anzahl der Lederhaut- und Epidermisblättchen, ihre Form und ihre Winkelstellung zur Klauenbeinoberfläche gegeben. Mit der Form werden die proximodistale Länge, Höhe und Breite der Lamellen respektive Blättchen beschrieben. Durch die Entwicklung des spezifischen Blättchenapparates wird die Kraftwirkung auf eine möglichst große Oberfläche verteilt und somit einer Überbelastung entgegengesteuert.

Insgesamt verlaufen 1800 bis 2100 parallel angeordnete Lamellen pro Hinterklaue im distalen Bereich des Wandsegmentes bis zur Umschlagstelle am Tragrand, um als niedrige Leisten im Sohlensegment weiterzuziehen. Die Klauen der Hintergliedmaße haben deutlich mehr Lamellen als die Klauen der Vordergliedmaße. An der Vordergliedmaße werden durchschnittlich 1600 bis 1800 Lamellen pro Klaue im distalen Bereich des Wandsegmentes ermittelt. Die räumliche Verteilung der Lamellen korreliert mit der Stärke der Zugkraft in den unterschiedlichen Bereichen des Wandsegmentes. Am Zehenrücken der Klaue wie auch im Bereich der abaxialen Wandfläche der lateralen Klaue stehen durchschnittlich 125 Lamellen pro cm Wandfläche. An der medialen Klaue liegt die Anzahl der Lamellen nur im Bereich des Zehenrückens und des apikalen Drittels der abaxialen Wandfläche bei 120 Lamellen pro cm. Ab dem apikalen Drittel verringert sich palmar die durchschnittliche Anzahl auf 100 Lamellen pro cm. Im axialen Bereich des Wandsegmentes der lateralen sowie medialen Klaue ist die Anzahl auf durchschnittlich 87 Lamellen pro cm begrenzt. Hinzu kommt, dass auf der axialen Wandfläche der Klaue der Blättchenapparat nur bis zum Ende des axialen Sohlenschenkels reicht, bis kurz hinter der Mitte der Klauengrundfläche, während er sich auf der abaxialen Wandfläche bis weit in den Trachtenbereich erstreckt. An der ausgeschuhten Klaue wird ersichtlich, dass die Lamellen den solearen Klauenrand in einem  $45^\circ$  Winkel erreichen, wo sie sich auf die Fußungsfläche umschlagen. Im distalen Bereich des Kronsegmentes gehen die Lederhautpapillen aus niedrigen Lederhautleisten hervor, die in Reihen angeordnet sind und

sich proximodistal orientieren. Die faden- bis kegelförmigen Lederhautpapillen sitzen den Leisten mit einer breiten Basis auf, um sich allmählich zur Spitze hin zu verjüngen. Die Spitze der Lederhautpapillen ist abgerundet und neigt sich klauenspitzenwärts. Neben den Hauptpapillen sind Neben- und Sekundärpapillen ausgebildet, die im Übergangsbereich zum Wandsegment anzahlmäßig zunehmen. Die basalen Leisten des Kronsegmentes gewinnen an Höhe und gehen in die Lederhautblättchen des Wandsegmentes über, während die aus ihnen entspringenden proximalen Kappenpapillen immer kürzer und seltener werden. Die proximodistale Ausdehnung des Blättchenapparates ist mit durchschnittlich 4,4 cm am lateralen epidermalen Klauenschuh am Zehenrücken am höchsten, wobei sie sich auf der abaxialen Wandfläche trachtenwärts auf 2 cm verringert. Eine Höhenabnahme tritt erst im mittleren Drittel der abaxialen Wandfläche auf, da die proximodistale Ausdehnung des Blättchenapparates am Zehenrücken und dem apikalen Drittel der Wandfläche die gleiche Höhe erreicht. Auf der axialen Wandfläche der Klaue vermindert sich die proximodistale Ausdehnung der Lamellen bis zum axialen Ende des Sohlenschenkels kontinuierlich bis auf 3 mm. Bei einer zirkumferenten Betrachtung des dermalen Blättchenapparates fällt die unterschiedliche Blättchenorientierung auf. Der Stellungswinkel der Lamellen variiert nicht nur in dorsopalmarer/-plantarer Richtung, sondern auch in ihrem proximodistalen Verlauf. Bei einer proximodistalen Betrachtung der Lederhautblättchen fällt auf, dass sie im unbelasteten Zustand einen geschlängelten Verlauf nehmen. Die Schlängelung nimmt in proximodistaler Richtung des Wandsegmentes zu und beeinflusst die Form und den Stellungswinkel der Lamellen. Auf der abaxialen Wandfläche der Klaue ist der geschlängelte Verlauf der Lamellen weit stärker ausgeprägt als axial. Am Zehenrücken verlaufen die Lamellen nahezu gerade und sind senkrecht zur Klauenbeinoberfläche ausgerichtet. Im apikalen Drittel des Wandsegmentes folgen auf der abaxialen Wandfläche die Lamellen der Krafteinwirkung in radialer Ausrichtung. Im mittleren Drittel des Wandsegmentes fällt besonders an der abaxialen Wandfläche eine starke Schlängelung der Lamellen auf. Im palmaren/plantaren Drittel der abaxialen Wandfläche sowie im Trachtenteil stehen die Lamellen in einem spitzen Stellungswinkel und sind apikal in Richtung Klauenspitze geneigt.

Axial sind die Lamellen im apikalen und mittleren Drittel der Wandfläche radial orientiert und im palmaren/plantaren Drittel dahingegen apikal ausgerichtet.

Falls die Lederhautblättchen nicht radiär zur Klauenbeinoberfläche ausgerichtet sind, dann lässt sich eine zugabgewandte und eine zugbeanspruchte Seite des Lederhautblättchens voneinander unterscheiden. Die zugbeanspruchte Seite des Lederhautblättchens zeichnet sich durch die Nachbarschaft von längsovalen Basalzellen aus, durch lange basale zytoplasmati-

sche Zellausläufer der Basalzellen, eine dicke Basalmembran und durch eine hohe Konzentration an elastischen Fasern (Abb. 19 a). Die Basalzellen sind an der zugabgewandten Seite des Lederhautblättchens dahingegen breiter und ihre basalen zytoplasmatischen Ausläufer wirken eher kurz und plump. Eine unauffällige Basalmembran folgt der Kontur der basalen Zellausläufer der Basalzelle (Abb. 19 a).

Die einzelnen Lederhautblättchen verjüngen sich kontinuierlich von der Basis bis zu ihrem First. Im distalen Bereich des Wandsegmentes ist der First der Lederhautblättchen nahezu immer ballonartig abgerundet (Abb. 9 a), indes lassen die Blättchen im proximalen und mittleren Bereich des Wandsegmentes diese ballonartige Erweiterung nicht erkennen. Die Basisbreite der Lederhautblättchen nimmt proximodistal ab, korrelierend mit einer Höhenzunahme, so dass eine Oberflächenvergrößerung des Blättchenapparates distal im Wandsegment festzustellen ist. Im distalen Bereich des Wandsegmentes finden sich höhere und schmalere Lamellen als noch in den proximalen Bereichen. Die dermoepidermale Grenzfläche vergrößert sich proximodistal des Wandsegmentes, auch durch die zunehmende Gabelung der Blättchen im mittleren Bereich des Wandsegmentes bedingt (Abb. 10 c).

An der axialen Wandfläche ist die Basis der Blättchen breiter, und sie stehen weiter auseinander, verglichen mit den Verhältnissen in anderen Bereichen des Wandsegmentes. Die durchschnittliche Höhe der Blättchen von 1 mm ist axial geringer, so dass sich die Lederhautblättchen an der axialen Wandfläche eher plump darstellen.

### **3.2 Die dermoepidermale Grenzfläche im Wandsegment**

Die Basalmembran und die basalen zytoplasmatischen Ausläufer der Basalzellen formen mit ihren speziellen Kontakteinheiten, den Hemidesmosomen, als funktionelle Einheit die dermoepidermale Grenzfläche, die die dermalen und epidermalen Anteile des Klauenbeinträgers miteinander verankert. Das Erscheinungsbild der dermalen Lamina fibroreticularis, der epidermalen Lamina densa und Lamina rara sowie der basalen zytoplasmatischen Ausläufer der Basalzellen variiert entsprechend der Zugbeanspruchung des Klauenbeinträgers. Im mittleren und distalen Bereich des Wandsegmentes ist ihre Modifikation besonders stark ausgeprägt. Die Basalmembran stellt sich lichtmikroskopisch als ein unterschiedlich breites, PAS-positives, rosarotes Band dar, das eine maximale Dicke von bis zu 1 µm erreicht (Abb. 16 c). Eine vornehmlich an der Basis der Lederhautblättchen auftretende Schwankung ihrer Dicke korreliert mit einer starken Schlängelung der Lederhautblättchen. Die Basalmembran ist in besonders zugbeanspruchten Bereichen verdickt, vor allem im distalen Be-

reich des Wandsegmentes am Zehenrücken sowie dem apikalen Drittel der abaxialen und axialen Wandfläche.

Die Basalzellen besitzen an ihrer basalen Oberfläche unterschiedlich stark ausgebildete zytoplasmatische Zellausläufer, deren Kontur von einer Basalmembran bedeckt wird. Die basalen zytoplasmatischen Ausläufer der Basalzellen sind heteromorph, jedoch grundsätzlich trajektorieell in Zugrichtung des Klauenbeinträgers ausgerichtet (Abb. 16 c). Lichtmikroskopisch sind nur kleine basale fingerförmige Ausläufer der Wurzelfüßchen zu erkennen, die vermehrt an der Basis der Lederhautblättchen die Dermis invaginieren. Am First des Lederhautblättchens nehmen Höhe und Anzahl der Wurzelfüßchen ab.

Dort, wo vermehrt kollagene, elastische und retikuläre Fasern in die Basalmembran einstrahlen, erscheint diese verbreitert. Die Kollagenfasern ziehen, der Zugrichtung folgend, in die Lederhautblättchen hinein und folgen der Kontur der Basalmembran. Elastische Fasern verlaufen ebenfalls parallel zur Kontur der Basalmembran, bevor sie im spitzen Winkel an ihr enden (Abb. 9 c). Diese Fasern konzentrieren sich verstärkt an der Basis der Lederhautblättchen, wo ihr Faserdurchmesser größer ist.

An der Basis der Lederhautblättchen folgen retikuläre Fasern dichtgedrängt der Kontur der Basalmembran, die sich dadurch verdickt. An der Spitze der Lederhautblättchen wird ihre Dichte geringer und die retikulären Fasern sind breiter und gewellter. Sie kennzeichnen ebenfalls den Umriss respektive den Verlauf der Kapillarschleifen. Fibrozyten verdichten sich vorwiegend zentral im Lederhautblättchen und sind mit ihrer Längsachse in Zugrichtung des Klauenbeinträgers orientiert. Einige Fibrozyten folgen in geringem Abstand der Kontur der Basalmembran.

### **3.3 Der epidermale Teil des Klauenbeinträgers im Wandsegment mit seiner Verankerung am inneren Kronhorn**

Der epidermale Teil des Klauenbeinträgers erstreckt sich von der dermoepidermalen Grenzfläche bis zum inneren Kronhorn und wird von der Blättchen-, Terminal- und Kappenepidermis gebildet (Abb. 17 a et b). Der epidermale Teil des Klauenbeinträgers durchdringt mit den Hornzellen der parietalen Hornblättchen das koronale Zwischenröhrchenhorn, um sich gemeinsam den Kronhornröhrchen anzunähern (Abb. 17 a/Einleger). Die Epidermisgrenzfläche und die dermale Oberfläche verhalten sich kongruent zueinander, somit ist die Anzahl der dermalen und epidermalen Blättchen identisch. Lediglich im entspannten Zustand der Klaue ist die Schlingelung des epidermalen Blättchenapparates in seiner Längsrichtung stärker ausgeprägt als bei den Lederhautblättchen. Im proximalen und mittleren Bereich des Wandseg-

menten sind die Epidermisblättchen vornehmlich von der hochgradigen Schlängelung betroffen. Die Blättchen sind parallel zueinander angeordnet (Abb. 16 a) und werden von ihrer Basis bis zum First schmaler und proximodistal im Wandsegment kontinuierlich höher.

In Arealen mit einer sehr starken Zugbelastung, wie an der Basis der Lederhautblättchen im distalen Bereich des Wandsegmentes, sind die Basalzellen länglicher und schmaler und erreichen ihre höchste längsovale Ausdehnung. Die Basalzellen haben lediglich am First der Lederhautblättchen eine querovale Form. Die basophilen Basalzellen besitzen einen zentroapikal gelegenen Zellkern. Die Form des Zellkernes passt sich dem Erscheinungsbild der Basalzellen an, so finden sich längsovale Kerne bei den schmalen, längsovalen Zellen und runde Zellkerne mit deutlichem Nukleolus in rundlichen Basalzellen. Die ersten zwei Spinosazellreihen, die den Basalzellen direkt aufliegen, verfügen über eine geringfügig größere Form als die Basalzellen (Abb. 16 c). Die Spinosazellen besitzen eine ovale Gestalt mit zentral gelegenem, spindelförmigem Zellkern und kleinem Nukleolus. In den zentral gelegenen Zellreihen gewinnen die Spinosazellen schnell an Größe und nehmen ihre charakteristische polygonale Form an (Abb. 16 d). Die kleineren Spinosazellen färben sich schwächer azidophil; bei den größeren Zellen ist durch das vermehrte Auftreten von Keratinfilamentbündeln ein stärkeres azidophiles Färbeverhalten zu verzeichnen. Die Spinosazellen orientieren sich in Längsrichtung der Epidermisblättchen. Polarisationsoptisch wird ersichtlich, dass die in den Zellen integrierten Keratinfilamentbündel ebenfalls den Trajektorien des Klauenbeinträgers folgen, also in Längsrichtung der Epidermisblättchen ausgerichtet sind. Der Interzellularspalt zwischen den Spinosazellen des Epidermisblättchens bleibt gleichmäßig eng, nur feine Stachelfortsätze verbinden die Zellen und überbrücken den Interzellularspalt.

Die Epidermiszellen bilden die über den Firsten der Lederhautblättchen gelegenen arkadenförmig übereinander liegenden Kappenhornzellen (Abb. 16 e). Diese Zellen sind weniger stark abgeplattet und bestehen aus mehreren Zelllagen, die tangential zur Klauenoberfläche verlaufen. Sie sind im Querschnitt polygonal und im Längsschnitt rechteckig, womit sich eine zylinderförmige Zelle abzeichnet. Durch diese Form unterscheiden sie sich von den Blättchenhornzellen. Die lateral gelegenen Kappenhornzellen besitzen eine langgestreckte Form und bilden so einen fließenden Übergang zu den Hornzellen der benachbarten Blättchen. Die Hornzellen der Epidermisblättchen verändern ihre Ausrichtung an deren Basis und sind mit den Hornzellen des Zwischenröhrchenhornes verflochten. Die proximodistal orientierten Kronhornröhrchen, aus Mark und Rinde bestehend, werden vom Zwischenröhrchenhorn umgeben (Abb. 17 a).



### 3.4 Das Sohlensegment

#### 3.4.1 Der bindegewebige, vornehmlich dermale Teil des Klauenbeinträgers im Sohlensegment

Das Sohlensegment agiert als eine Art funktionelles Bindeglied zwischen dem zugbelasteten Klauenbeinträger im Wandsegment und den druckbelasteten Strukturen im Ballensegment. Das Sohlensegment zeichnet sich einerseits durch ein geordnetes dreidimensionales Fasersystem aus, das bei der Übertragung der Zugkraft mitwirkt, indem Kollagenfasern des Sohlensegmentes in den Klauenbeinträger im Wandsegment einstrahlen, und andererseits treten im Sohlensegment besondere Matrixkomponenten auf, die sich am Stoßbrechungsmechanismus der Klaue beteiligen.

Ein Periost ist im Sohlensegment nicht ausgebildet, somit schließt sich der Klauenbeinoberfläche eine faserknorpelige Ansatzzone direkt an (Abb. 18 a). Die Zone des verkalkten Faserknorpels ist 200 bis 250  $\mu\text{m}$  dick. Chondroide Zellen sind nahezu gleichmäßig in dieser Zone verteilt. Der Klauenbeinoberfläche direkt angrenzende spindelförmige Knorpelzellen sind mit ihrer Längsachse parallel zur Knochenoberfläche orientiert. In Annäherung an die Tidemark respektive Mineralisationszone ändert sich ihre Ausrichtung und ihre Längsachse orientiert sich klauenspitzenwärts. Die chondroiden Zellen enthalten einen längsovalen bis rundlichen Zellkern und werden von einem Knorpelhof umgeben.

Bis zu fünf Mineralisationszonen sitzen der Klauenbeinoberfläche indirekt kappenartig auf und deuten auf die hohe mechanische Beanspruchung hin. Ihre Basophilie und ihre Dicke sind unterschiedlich ausgeprägt. Die Mineralisationszone, die dem Klauenbein am nächsten liegt, ist bis zu 4  $\mu\text{m}$  dick und zeigt ein intensives basophiles Färbeverhalten. Angrenzende Mineralisationszonen erreichen eine Dicke von 2  $\mu\text{m}$ . Der Übergang von der verkalkten zur unverkalkten Zone des Faserknorpels wird nicht nur durch die Tidemark ersichtlich, sondern auch durch eine Abnahme des Gehaltes an neutralen Mukopolysacchariden in der Grundsubstanz der Zone des unverkalkten Faserknorpels. Diese ist mit einer Dicke von durchschnittlich 25  $\mu\text{m}$  schmal und ausgesprochen zellarm. Die vereinzelt chondroiden Zellen haben eine längliche bis rundliche Form. Kollagene Fasern ziehen von der osteochondralen Grenzlinie vorwiegend in einem  $45^\circ$  Winkel durch die Faserknorpelzone (Abb. 18 b).

Im Sohlensegment sind dicht aggregierte Kollagenfaserbündel unterschiedlicher Stärke in Richtung der stärksten Belastungsintensität orientiert. Das Kollagenfasersystem des Sohlensegmentes kann in vier Gruppen eingeteilt werden. Dicht aggregierte Kollagenfasern in dichten Bündeln, kräftigen Bündeln und feinen Bündeln sowie einzeln verlaufende Kollagenfa-

sern formen gemeinsam durch die dreidimensionale Anordnung ein Netzwerk, das zusammen mit der umgebenden Grundsubstanz die Funktion eines viskoelastischen Kissens übernimmt. Dicht aggregierte Kollagenfasern in derben Bündeln verlaufen einerseits parallel zur sohlenseitigen Klauenbeinoberfläche und andererseits in einigem Abstand parallel zur epidermalen Sohlenfläche. In einem  $45^\circ$  Winkel verbinden starke kollagene Faserzüge wiederum diese beiden parallel verlaufenden Faserstränge miteinander (Abb. 18 b).

Dicht aggregierte Kollagenfasern in kräftigen Bündeln entspringen am Margo solearis des Klauenbeines und unterstützen die Kollagenfaserbündel des Wandsegmentes, indem sie nach parallelem Verlauf mit ihnen zur dermoepidermalen Grenzfläche im Bereich der Zehenspitze ziehen.

Dicht aggregierte Kollagenfasern in feinen Bündeln ziehen in einem  $45^\circ$  Winkel von der osteochondralen Grenzlinie bis in die Spitze der Sohlenpapillen hinein, wo sie ein zentral gelegenes Gefäß umgeben. Lange, schlanke bis kegelförmige Sohlenpapillen sind in Richtung der Klauenspitze geneigt. Außerdem verlaufen dicht aggregierte Kollagenfasern in feinen Bündeln an der Basis der Sohlenpapillen und inserieren an der Zehenspitze.

Zwischen den Faserbündeln finden sich einzelne Kollagenfasern, die keiner bestimmten Verlaufsrichtung zuzuordnen sind.

Die Dichte der einzelnen kollagenen und elastischen Fasern ist an der Basis der Lederhautpapillen im Sohlenkörper und besonders im abaxialen Sohlenschenkel besonders hoch.

Saure Mukopolysaccharide verteilen sich am Übergang vom Wand- zum Sohlensegment in einer sehr hohen Konzentration. Im Gegensatz zum Wandsegment zeigen die Kollagenfaserbündel im gesamten Sohlensegment eine starke Alcianblau-Reaktion, die das Vorkommen von sauren Mukopolysacchariden kennzeichnet. Der Gehalt an neutralen Mukopolysacchariden in der Grundsubstanz nimmt von der Klauenbeinoberfläche in Richtung der Tidemark zu.

### **3.4.2 Die dermoepidermale Grenzfläche im Sohlensegment**

Während die Kollagenfasern in Längsrichtung der Sohlenpapille ausgerichtet sind, inserieren die elastischen Fasern in einem spitzen Winkel an der Basalmembran. Die Basalzellen invaginieren mit ihren geweihartig aufgezwigten basalen zytoplasmatischen Zellausläufern die Dermis (Abb. 18 c). Die Basalmembran ist an der Spitze der basalen zytoplasmatischen Ausläufer der Basalzelle mit 500 nm verdickt, während sie in den anderen Bereichen mit einer Dicke von bis zu 250 nm gleichmäßig schmal ist. Retikuläre Fasern konzentrieren sich in der Lamina fibroreticularis vornehmlich an der Basis der Sohlenpapille bis zu ihrem basalen Drittel.

### 3.4.3 Die Epidermisformation im Sohlensegment

Die epidermalen Röhren zeichnen sich durch ihre hohe Dichte und gleichmäßige Form aus, die in regelmäßigen Abständen voneinander stehen (Abb. 18 f). Die überwiegend ovalen Röhren mit einem Durchmesser von bis zu 90 µm haben eine dicke Markzone. Die Rinde der Sohlenröhren besteht aus drei bis vier Zellschichten, die sich relativ deutlich gegen das Zwischenröhrenhorn abgrenzen lässt. Die Sohlenröhren sind parallel zueinander angeordnet und verlaufen in einem spitzen Winkel zur Klauenspitze. Im Sohlenkörper sind die kräftigsten Röhren ausgebildet.

## 4. Ergebnisse der transmissionselektronenmikroskopischen Untersuchungen

Die transmissionselektronenmikroskopische Untersuchung dient der Betrachtung besonders interessanter struktureller Feinheiten des Klauenbeinträgers im Wand- und Sohlensegment, die durch die Lichtmikroskopie nicht sichtbar gemacht werden konnten.

### 4.1 Die Ansatzzone des Klauenbeinträgers am Klauenbein

Kalziumphosphat-Kristalle des Knochens stellen sich als winzige Kügelchen mit unterschiedlicher Elektronendichte dar. Eine osteocondrale Linie markiert die Grenze zwischen der Zone des lamellären Knochens und der Zone des verkalkten Faserknorpels. Die kollagenen Fibrillen verlaufen parallel zueinander und dringen durch die osteocondrale Grenze.

Die Zone des verkalkten Faserknorpels zeichnet sich durch ihre Kontrastlosigkeit aus, in der lediglich die chondroiden Zellen und die kollagenen Fibrillen deutlich zu erkennen sind. Die wenigen chondroiden Zellen liegen in einer Lakune, die eine geringe, homogen verteilte Menge an Proteoglykanen enthält (Abb. 6 a). Diese Lakune wird durch eine osmiophile Linie gegenüber der Interzellularsubstanz des verkalkten Faserknorpels abgegrenzt. Das Zytoplasma besitzt kurze Zellausläufer und integriert homogen verteilte, mäßig elektronendichte Granula. Der prominente Zellkern ist euchromatisch (Abb. 6 a). Demgegenüber stehen Knorpelzellen mit elektronendichtem Zytoplasma, das wiederum eine hohe Konzentration an Glykogengranula aufweist. Der Glykogengehalt der chondroiden Zellen ist im verkalkten Faserknorpel weit höher als in der Zone des unverkalkten Faserknorpels. Heterochromatin verdichtet den Zellkern. Unweit der Tidemark sind die chondroiden Zellen weitgehend nekrotisch (Abb. 6 b). Ihre Zellmembran und ihr Zellkern bestehen meist nur noch aus Fragmenten. Das Zytoplasma ist mit Glykogengranula unterschiedlicher Elektronendichte angefüllt. In Annähe-

nung an die Tidemark lagert sich immer mehr elektronendichtes Material an die Oberfläche der kollagenen Fibrillen, welches durch diese Eigenschaft die Tidemark markiert (Abb. 6 e). Am Margo solearis des Klauenbeines ist die Zone des verkalkten Faserknorpels sehr dick. In diesem Bereich mit einer hohen Stoffwechselaktivität finden sich chondroide Zellen in isogenen Gruppen angeordnet (Abb. 6 f). Als Zeichen einer hohen Proteinbiosynthese in den chondroiden Zellen enthält der abgerundete und euchromatische Zellkern bis zu drei gut entwickelte Nukleoli (Abb. 6 f). Der Bereich am Margo solearis wird geringgradig druckbelastet und stellt gleichzeitig die Zone mit der höchsten Zugbelastung dar.

Die Tidemark ist eine unregelmäßig breite und elektronendichte Zone, die durch osmiophile Grenzlinien den jeweiligen Übergang zwischen verkalktem und unverkalktem Faserknorpel kennzeichnet (Abb. 6 e). Sie verläuft parallel zur Klauenbeinoberfläche. Kollagene Fibrillen durchziehen diese Mineralisationszone ohne Richtungsänderung (Abb. 6 d). Bei der Betrachtung von kollagenen Fibrillen im Querschnitt wird ersichtlich, dass sich elektronendichtes Material nur an deren Oberfläche anlagert und somit ihren Umriss kennzeichnet (Abb. 7 a). Dieses elektronendichte Material ist auch noch in der näheren Umgebung der Fibrillengrenze zu erkennen. Dieser Effekt verdeutlicht die unterschiedlich starke Bündelung der kollagenen Fibrillen, die die Tidemark durchkreuzen. Wo nur wenige Kollagenfibrillen in die Ansatzzone einstrahlen, ist die Tidemark gleichmäßig schmal. Durchziehen dicht aggregierte Kollagenfasern in kräftigen Bündeln die Faserknorpelzonen, so ist die Tidemark breiter und unregelmäßiger. Diese Unregelmäßigkeit wird durch das Phänomen verursacht, dass die Tidemark durch eine osmiophile Linie jeweils zur Zone des verkalkten und unverkalkten Faserknorpels begrenzt wird, sich diese zwei Linien aber unterschiedlich ausdehnen. Die osmiophile Linie verläuft zur Zone des verkalkten Faserknorpels gleichmäßig schmal und nur mäßig elektronendicht, während sie zur Zone des unverkalkten Faserknorpels zackenförmige Ausläufer aufweist (Abb. 6 e). Die starke Osmiophilie der Grenzlinie wird durch die erhöhte Konzentration des mineralisierten Materials verursacht, das den kollagenen Fibrillen angelagert ist und so die zackenartige Kontur zur Zone des unverkalkten Faserknorpels bewirkt. Wird die Ansatzzone von starken Kollagenfaserbündeln durchzogen, dann ist die Tidemark inmitten ihres Verlaufes in diesem Areal unterbrochen. An den Grenzbereichen zu den kräftigen Bündeln ist die Tidemark dicker und fällt besonders durch ihre starken gezackten Ausläufer auf. Ihre Dicke wird auch durch die Anwesenheit von chondroiden Zellen geprägt. In unmittelbarer Nähe von chondroiden Zellen respektive membranumhüllten Zellfragmenten ist sie dicker, mit der größten Ausdehnung an den jeweiligen Kontaktstellen zur Knorpelzelle.

Die Zone des unverkalkten Faserknorpels ist relativ schmal. Sie ist durch eine fein strukturierte Grundsubstanz sowie auffällige chondroide Zellen gekennzeichnet (Abb. 7 b). Diese sind in einer Interzellulärsubstanz aus Kollagenfibrillen, Proteoglykanen und Matrixvesikeln (Abb. 7 d) eingebettet. Die chondroiden Zellen liegen in unterschiedlichen Erscheinungsformen vor, wobei eine Wechselbeziehung zwischen Form und Lokalisation besteht. Die Mehrzahl der chondroiden Zellen ist oval und einheitlich groß. In Annäherung an die Tidemark sind jedoch einerseits längliche chondroide Zellen parallel zur Tidemark zu finden und andererseits in Richtung des Faserverlaufs orientierte Zellen. Daneben finden sich ebenso viele membranumhüllte Zellfragmente. Chondroide Zellen, die direkt der Tidemark anliegen, folgen zwangsläufig nicht der Faserverlaufsrichtung. Sie besitzen einen kleinen Knorpelhof und sind zunehmend schmal und langgestreckt, mit einem ebenso geformten heterochromatischen Zellkern. Die Zytoplasmafortsätze sind nur angedeutet oder teilweise zerstört (Abb. 7 c). Im Zytoplasma fallen vor allem viele runde Glykogengranula auf, die direkt der Zellmembran anliegen. Die chondroiden Zellen, die sich mit ihrer Längsachse in Richtung des Faserverlaufs orientieren, besitzen nur kurze Zytoplasmafortsätze. Unweit der Tidemark fehlen Matrixvesikel, und die Proteoglykane sind nur noch in geringer Konzentration anzutreffen. Inmitten der Zone des unverkalkten Faserknorpels sind die chondroiden Zellen von einem sehr schmalen Knorpelhof umgeben. Der Hof ist mit Proteoglykanen angefüllt, die sich als feingranuläres Material darstellen. Proteoglykane sind als elektronendichte Granula mit fädigen Schenkeln zu erkennen. Von kollagenen Fibrillen benachbart, erhöht sich die Konzentration der Proteoglykane jeweils um die chondroiden Zellen und in Annäherung an die Tidemark. Charakteristisch für die chondroiden Zellen sind weiterhin der schmale Zytoplasmasaum und die nur kurzen Zytoplasmafortsätze, die mit feingranulären, elektronendichten Matrixvesikeln angefüllt sind (Abb. 7 b). Das intrazelluläre filamentäre Stützgewebe ist homogen verteilt und weniger osmiophil als der Zellkern. Der prominente Zellkern füllt fast die gesamte Zelle aus. Er wird von elektronendichten Chromatinschollen und feingranulärem Chromatin in gleichem Maße angefüllt. In Annäherung an die Zellmembran der chondroiden Zellen sind viele kleine rundliche Matrixvesikel mit einer Doppelmembranhüllung zu erkennen (Abb. 7 e). Innerhalb der Zelle lagern sich ebenfalls Vesikel an die Innenwand der Membran an, die durch ihre Elektronendichte auffallen. Der Übergang von der Zone des unverkalkten Faserknorpels zur Zone des parallelfaserigen straffen Bindegewebes ist fließend. Die Grundsubstanz nimmt an Strukturen deutlich zu und die Bindegewebszellen liegen als Fibrozyten vor. Diese sind spindelförmig mit einem großen zentral gelegenen Nukleus.

## 4.2 Die dermoepidermale Grenzfläche im Wandsegment

Neben den strukturellen Besonderheiten der Epidermisblättchen und der dermoepidermalen Grenzfläche ist vor allem der funktionelle Aspekt dieser Strukturen von Bedeutung. Die Aufgabe der funktionellen Einheit des Blättchenapparates besteht primär in der Verankerung des Klauenbeinträgers respektive der Aufhängung des Klauenbeines, gleichwohl dieses Verankerungssystem zusammen mit dem Fasersystem der Dermis für eine elastische Abfederung bei der Belastung sorgt. Der Zielsetzung dieser Arbeit zur Folge interessiert insbesondere das dermale Fasersystem.

Die dermoepidermale Grenzfläche wird von der dreischichtigen Basalmembran sowie der Zellmembran der Basalzellen und deren Kontakteinheiten gebildet (Abb. 13 a). Die Basalmembran ist im gesamten Bereich der Wandlederhaut deutlich ausgebildet. Sie ist in die Lamina fibroreticularis, Lamina densa und in die Lamina rara gegliedert, wobei die Lamina densa und die Lamina rara gemeinsam auch Basallamina genannt werden. Die Wurzelfüßchen der Basalzellen respektive die basalen zytoplasmatischen Zellausläufer der Basalzellen formen durch ihre fingerförmigen, verschieden langen, dicht angeordneten Ausstülpungen ein unruhiges Bild der dermoepidermalen Grenzfläche (Abb. 13 c). Außerordentlich auffallend ist die trajektorielle Ausrichtung der basalen zytoplasmatischen Zellausläufer, besonders auf der zugbeanspruchten Seite derjenigen Lederhautblättchen, die nicht radiär zur Klauenbeinoberfläche ausgerichtet sind (Abb. 13 c). Die basalen Zellausläufer der Basalzelle invaginieren geweihartig die Lederhautunterlage. Die längsten basalen Zellausläufer finden sich an der Basis der Lederhautblättchen und einseitig entlang der in Zugrichtung des Klauenbeinträgers ausgerichteten Seite eines Lederhautblättchens (Abb. 13 d). An der zugabgewandten Seite eines Blättchens sind die Basalzellen eher isoprismatisch geformt und ihre basalen zytoplasmatischen Ausläufer sind weniger stark ausgeprägt. Die Kontakteinheiten der Basalmembran der Basalzelle, die Hemidesmosomen, bestehen aus einem elektronendichten intrazellulären Bereich, dem attachment plaque, und einer extrazellulären Komponente, dem sub basal dense plaque, die beide auch als Haftplatten bezeichnet werden (Abb. 13 b). Der attachment plaque liegt auf der zytoplasmatischen Seite der Zellmembran der Basalzelle und wölbt sich als elektronendichter Halbkreis in das Zytoplasma der Basalzelle vor. Tonofilamentbündel ziehen innerhalb der Basalzellen in Richtung Hemidesmosomen und enden am attachment plaque (Abb. 13 b). Der sub basal plaque liegt als extrazelluläre Komponente der Hemidesmosomen in der Lamina rara, in geringer Distanz von der Zellmembran der Basalzelle entfernt. Der geringe Abstand der beiden Haftplatten von 30 nm wird durch mäßig elektronendichtes Material sichtbar. Die Anzahl und die Form der Hemidesmosomen fallen in den verschiedenen Regio-

nen der basalen zytoplasmatischen Ausläufer der Basalzellen unterschiedlich aus. An der Spitze und im apikalen Pol der basalen Zellausläufer sind sie häufig anzutreffen und wirken breit und gedrunken. Basal wird ihre Anzahl geringer und ihre Form flacher. Die Hemidesmosomen besitzen einen Durchmesser von 30 bis 100 nm.

Die Lamina rara verläuft parallel zur basalen Zellmembran der Basalzellen. Sie ist weniger elektronendicht als die angrenzende Zellmembran und die Lamina densa. Die Lamina rara ist mit 70 nm gleichmäßig dick, bis auf Bereiche, in denen die Haftplatten (sub basal dense plaque) der Hemidesmosomen ausgebildet sind. In diesen Arealen ist sie schmaler als in den Bereichen zwischen den Hemidesmosomen (Abb. 13 a). Auf die Lamina rara folgt dermisnah die Lamina densa, eine elektronendichte, unregelmäßig dicke Linie von 30 bis 70 nm. Die Anwesenheit der Hemidesmosomen bewirkt, dass sich das feingranuläre Material der Lamina densa in diesen Arealen noch verdichtet (Abb. 13 b). An die Zone der Lamina densa grenzt die Lamina fibroreticularis. Sie ist nur mäßig elektronendicht und durch filamentäre Strukturen gekennzeichnet. Kollagenfibrillen, Ankerfibrillen und Proteoglykane sind Bestandteile der Lamina fibroreticularis (Abb. 13 b). Ihre höchste Ausdehnung erlangt diese Zone an den Spitzen der Wurzelfüßchen, den basalen zytoplasmatischen Ausläufern der Basalzelle (Abb. 14 f).

Die bei der Belastung des Klauenbeinträgers induzierte Positionsänderungen der dermoepidermalen Elemente gehen unter anderem auf die Eigenschaften von faserigen Komponenten der Dermis zurück. Sie sind für die Funktion des Klauenbeinträgers unerlässlich und werden im Folgenden einzeln aufgeführt.

Kollagene und elastische Fasern stellen die Begleitstrukturen der Basalmembran dar und verstärken die Kontur der dermoepidermalen Grenzfläche (Abb. 14 b). Sie folgen in einigem Abstand als parallel verlaufende Faserbündel der Form und Anordnung der Wurzelfüßchen, die trajektorieell ausgerichtet sind. Elastische Fasern bestehen aus einem Elastinkern, der von elektronendichteren Mikrofibrillen umgeben ist (Abb. 14 e). Dieser Mantel aus Mikrofibrillen nimmt unweit der Basalmembran an Dicke zu. In der unmittelbaren Umgebung von elastischen Fasern sind Proteoglykane in erhöhter Konzentration zu erkennen. Eine Vielzahl von elastischen Fasern inseriert im spitzen Winkel in der Lamina densa der zugbeanspruchten Seite des Lederhautblättchens (Abb. 14 e). Andere elastische Fasern folgen wellenartig dem Verlauf der Basalmembran.

Kollagenfibrillen verlaufen als Bestandteil der Lamina fibroreticularis parallel zur Lamina densa. Sie nehmen über die Ankerfibrillen indirekt Kontakt zur Lamina densa auf, indem die Ankerfibrillen von der Lamina densa ausstrahlen und die Kollagenfibrillen umschlingen (Abb. 14 d). Mikrofibrillenbündel inserieren direkt in der Lamina densa. Ihre Bündelung und

die bevorzugten Insertionsstellen liegen auf der Spitze der basalen zytoplasmatischen Zellausläufer der Basalzellen (Abb. 14 a). Sie dienen auch der Ummantelung von elastischen Fasern (Abb. 14 e).

Ankerfibrillen werden durch eine Querstreifung und durch ihre Affinität zu Kollagenfibrillen charakterisiert (Abb. 14 d). An Querschnitten von Kollagenfibrillen wird ersichtlich, dass sich die Ankerfibrillen förmlich an die Kollagenfibrillen lagern. Parallel angeordnete Ankerfibrillen ziehen von den Hemidesmosomen bis in die Lamina densa (Abb. 13 b), eine Vielzahl der Ankerfibrillen dringt bis zur Lamina fibroreticularis vor. Andererseits ziehen Ankerfibrillen auch von der Dermis bis in die Lamina densa, die den Ankerfibrillen als Verankerungsort dient (Abb. 14 c). Die Anzahl der Ankerfibrillen nimmt in der Umgebung der Haftplatten der Hemidesmosomen zu und erhöht die Elektronendichte der Lamina rara.

Proteoglykane sind in allen Bereichen der Basalmembran anzutreffen und den Mikrofibrillenbündeln angeheftet (Abb. 14 a). Proteoglykane lagern sich ebenfalls an Kollagen- und Ankerfibrillen sowie an elastische Fasern. Ihre höchste Konzentration liegt jedoch in der Lamina fibroreticularis vor, in der sie unregelmäßig verteilt sind. Tonofilamentbündel ziehen innerhalb der Basalzellen in Richtung Hemidesmosomen und nehmen mit dem attachment plaque der Hemidesmosomen Kontakt auf (Abb. 13 b).

### **4.3 Strukturelle Besonderheiten der dermoepidermalen Grenzfläche**

Veränderte strukturelle Gegebenheiten der Basalmembran oder einzelner Komponenten sind vornehmlich an der Spitze der basalen zytoplasmatischen Zellausläufer der Basalzellen anzutreffen. Oftmals können die veränderten Formen sowohl im Spitzen- als auch im Basisbereich des Lederhautblättchens beobachtet werden.

Eine Verdopplung der Basalmembran kann alle ihre Komponenten betreffen oder nur einzelne Areale wie die Lamina fibroreticularis und/oder Lamina densa. Werden alle Elemente der Basalmembran verdoppelt, so liegt das Äquivalent kuppenartig über den epidermisnahen Laminae (Abb. 15 a). Das feingranuläre Material der beiden Laminae densae ist wolzig aufgetrieben sowie elektronendichter und jeweils um das Doppelte verdickt. Dahingegen behalten die Laminae rarae ihre Dicke und ihren Grad an Elektronendichte bei.

Liegt eine Verdoppelung der Lamina densa und fibroreticularis vor (Abb. 15 b), so umschließt die verdoppelte Lamina densa den epidermisnahen Teil der Lamina fibroreticularis. Die verdoppelte Lamina densa ist dicker, elektronendichter und nimmt einen leicht wellenartigen Verlauf. Die epidermisnahe Lamina fibroreticularis behält ihre gewohnte Ultrastruktur, wäh-



rend in der epidermisabgewandten Lamina fibroreticularis mehr Mikrofibrillenbündel, Kollagenfibrillen und Ankerfibrillen vorkommen.

Eine Schleifen- oder Loopingbildung stellt eine Verdopplung der Lamina densa dar (Abb. 15 c). An diesem Erscheinungsbild sind angrenzende Hemidesmosomen beteiligt, in deren Höhe sich die Schenkel der auslaufenden bogenförmigen Schleife mit der epidermisnahen Lamina densa wieder vereinigen. Das Innere der Schleife entspricht der Ultrastruktur des feingranulären Materials der Lamina rara. Die Lamina rara weist zwischen den betroffenen Hemidesmosomen mehrere elektronendichte Granula auf.

Vereinzelt können Lamina densa-Extensionen beobachtet werden, die durch Anlagerung elektronendichten Materials an die Lamina densa entstehen (Abb. 15 d). Die Extensionen nehmen verschiedenartigen Umfang an. Ihr Vorkommen ist mit einem vermehrten Auftreten von Mikrofibrillenbündeln in diesem Bereich gekoppelt. Diesen Lamina densa-Extensionen benachbart finden sich besonders zahlreiche elektronendichte Hemidesmosomen und Ankerfibrillenbündel.

#### **4.4 Die dermoepidermale Grenzfläche im Sohlensegment**

Die basalen zytoplasmatischen Zellausläufer der Basalzellen invaginieren tief die Sohlenlederhaut und optimieren die dermoepidermale Verankerung. Die Wurzelfüßchen sind in Richtung Klauenspitze orientiert. Die einzelnen Abzweige (Primäräste) der geweihartigen basalen Zellausläufer besitzen wiederum kleine Aufzweigungen (Sekundäräste) (Abb. 18 e). Im Spitzenbereich der basalen zytoplasmatischen Zellausläufer der Basalzellen sind sehr zahlreiche Hemidesmosomen ausgebildet, während sie im Bereich der Basis und an den Flanken der Wurzelfüßchen in geringerer Anzahl erscheinen. Der Anteil von Ankerfilamenten nimmt im Sohlensegment im Gegensatz zum Wandsegment deutlich zu. Die Ankerfilamente inserieren an den Hemidesmosomen und dringen bis in die Lamina fibroreticularis vor. Die Anzahl der Kollagenfibrillen und der Mikrofibrillenbündel nimmt ebenfalls im Bereich des Sohlensegmentes zu, ansonsten sind keine strukturellen Unterschiede der dermoepidermalen Verbindung gegenüber der des Wandsegmentes zu vermerken.

### **5. Ergebnisse der morphometrischen Untersuchungen am Klauenbeinträger**

Die morphometrischen Untersuchungen dienen der Darstellung von Größenverhältnissen der strukturellen Komponenten des Klauenbeinträgers. Desgleichen wird auch die Oberflächen-

vergrößerung respektive -verkleinerung durch die Ausbildung des Blättchenapparates im Wandsegment erfasst. Die Ergebnisse der Messungen beziehen sich auf die jeweiligen Bereiche des Wandsegmentes am Zehenrücken sowie der abaxialen und axialen Wandfläche der Klaue. Die proximodistale Ausdehnung der Lederhautblättchen an der untersuchten Transversalscheibe beträgt an der abaxialen Wandfläche durchschnittlich 3 cm und an der axialen Wandfläche dementsprechend 2 cm. Die im Folgenden aufgeführten Ergebnisse stellen Mittelwerte der durchgeführten Messungen dar. Auf der Basis der morphometrischen Daten soll eine exemplarische Größenvorstellung des Klauenbeinträgers ermittelt werden, um ihm einen entsprechenden Grad an Zugbelastbarkeit in den verschiedenen Bereichen des Wandsegmentes zuordnen zu können.

### **5.1 Die Oberflächenverhältnisse der dermalen und epidermalen Teile des Klauenbeinträgers in den unterschiedlichen Bereichen des Wandsegmentes**

(siehe Texttabelle 1 bis 3)

Die ermittelte proximodistale Ausdehnung der Blättchen im Bereich des Zehenrückens beträgt durchschnittlich 4,4 cm. Im abaxialen Wandbereich nimmt die proximodistale Ausdehnung plantarwärts kontinuierlich ab. Im apikalen Drittel der abaxialen Wandfläche erreichen die Blättchen noch eine durchschnittliche Länge von 3,96 cm, im mittleren Drittel nur noch eine Länge von 2,94 cm und im Trachtenbereich sinkt die proximodistale Ausdehnung der Blättchen auf durchschnittlich 2,04 cm. An der axialen Wandfläche hat die Wandlederhaut ein geringeres Ausmaß, und sie reicht mit einer proximodistalen Ausdehnung von 3 mm nur bis kurz plantar der Hälfte der Klauengrundfläche, sozusagen bis zum Auslaufen des axialen Schenkels der Weißen Linie. Die folgenden Parameter des Klauenbeinträgers dienen der Ermittlung der Oberflächenverhältnisse im Wandsegment.

Der Abstand von der Klauenbeinoberfläche bis zur Basis der Lederhautblättchen (*Stratum reticulare*) nimmt in proximodistaler Richtung des Wandsegmentes kontinuierlich zu, gleichermaßen wie die Höhe der Lederhautblättchen (*Stratum lamellatum*). Am Zehenrücken erstreckt sich das Stratum reticulare im proximalen Bereich des Wandsegmentes bis zu 2,23 mm und erreicht an der Klauenspitze eine Ausdehnung von 5 mm. An der abaxialen Wandfläche verhält es sich ähnlich; auch hier vergrößert sich der Abstand von der Klauenbeinoberfläche bis zur Basis der Lederhautblättchen kontinuierlich bis auf 4,79 mm am Klauenrand. Auf der axialen Wandfläche erreicht das Stratum reticulare am Klauenrand ein Ausmaß von 3,45 mm. Die für das Stratum lamellatum ermittelten Werte liegen im proximalen Bereich des Wandsegmentes am Zehenrücken bei 0,97 mm und erhöhen sich distal bis zu

2,47 mm. Auch an der abaxialen Wandfläche verdoppelt sich distal die Höhe der Lederhautblättchen bis auf 2,4 mm. Auf der axialen Wandfläche ist nur ein dezenter Anstieg der Höhe des Stratum lamellatum bis auf 1,09 mm am Klauenrand festzustellen. Das Verhältnis von Stratum reticulare und Stratum lamellatum ist in jedem Bereich des Wandsegmentes zugunsten des Stratum reticulare ausgerichtet. Zu berücksichtigen ist, dass im proximalen Bereich des Wandsegmentes am Zehenrücken und der Wandflächen der Klaue der Übergang vom Kron- zum Wandsegment mit einbezogen wurde und damit verbunden, ein Areal, das nur über sehr niedrige Lederhautblättchen verfügt. Folglich ist im proximalen Bereich des Wandsegmentes eine durchschnittlich geringere Höhe der Lederhautblättchen zu ermitteln als in den distalen Bereichen, was dazu führt, dass sich ein höheres Verhältnis von Stratum reticulare zu Stratum lamellatum für den proximalen Bereich berechnen lässt. Das Verhältnis der beiden Parameter nimmt also von proximal nach distal des Wandsegmentes ab und nimmt am Klauenrand wieder zu. Distal ist für das Verhältnis zugunsten des Stratum reticulare der beträchtliche Abstand von der Klauenbeinoberfläche bis zur Basis der Lederhautblättchen verantwortlich, der in diesem Falle, wenn man dem Verlauf der kollagenen Faserbündel folgt, bis zur unverhornten Epidermis an der Klauenspitze respektive an den Tragrand reicht.

Die folgenden Parameter dienen der Berechnung der Oberflächenvergrößerung respektive der -verkleinerung durch die Ausbildung des Blättchenapparates im Wandsegment.

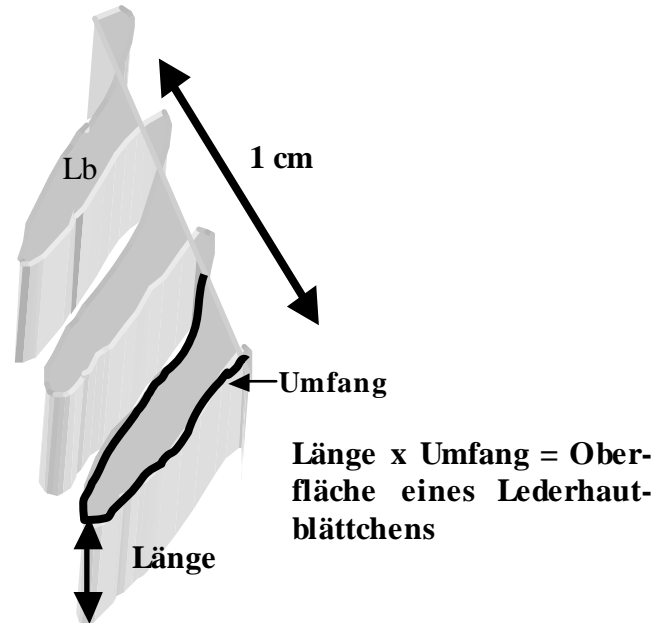
Der Umfang eines Blättchens, gemessen an der Länge der Basalmembran, nimmt von den proximalen Bereichen des Wandsegmentes bis zur Klauenspitze deutlich zu. Am Zehenrücken beträgt der Umfang eines Blättchens im proximalen Bereich des Wandsegmentes 1,9 mm und nimmt in proximodistaler Richtung bis auf 4,91 mm zu. Auf der abaxialen Wandfläche liegt der Umfang eines Blättchens im proximalen Bereich des Wandsegmentes bei 2,3 mm, der sich bis zum Klauenrand auf einen durchschnittlichen Wert von 4,83 mm erhöht. Für den Umfang der Blättchen auf der axialen Wandfläche wird proximal ein durchschnittlicher Wert von 1,6 mm ermittelt, der sich am Tragrand auf 2,05 mm erhöht.

Der durchschnittliche Umfang eines Lederhautblättchens beträgt am Zehenrücken der Klaue 3,26 mm. Der Umfang eines Blättchens an der abaxialen Wandfläche liegt bei 3,43 mm und der an der axialen Wandfläche bei nur 1,83 mm.

Die durchschnittliche Basisbreite der Lederhautblättchen variiert ebenfalls in den verschiedenen Bereichen des Wandsegmentes und nimmt in proximodistaler Richtung des Wandsegmentes ab. Die Lederhautblättchen werden distal des Wandsegmentes nicht nur höher, sondern auch schmaler. Am Zehenrücken der Klaue hat ein Lederhautblättchen an seiner Basis eine durchschnittliche Breite von 0,095 mm, woraus sich eine Dichte von 105 Blättchen

pro cm ermitteln lässt. Die durchschnittliche Basisbreite eines Blättchens an der abaxialen Wandfläche beträgt 0,0925 mm, das einer Dichte von 108 Blättchen pro cm entspricht. Die durchschnittliche Basisbreite eines Blättchens an der axialen Wandfläche beträgt 0,14 mm, was einer Dichte von 71 Blättchen pro cm entspricht. Auf der Grundlage dieser Daten lassen sich die Oberfläche eines Lederhautblättchens errechnen und die Blättchenoberfläche einer 1 cm dicken Sagittal- respektive Transversalscheibe.

**Textabb. 16:**  
schematische Darstellung der  
Lederhautblättchen (Lb)



**Texttabelle 1:** Die **Oberflächenverhältnisse eines Lederhautblättchens** im Wandsegment der Klaue, bezogen auf die Regionen des Zehenrückens, der abaxialen und axialen Wandfläche sowie die Blättchenoberfläche einer 1 cm breiten Sagittal- respektive Transversalscheibe

Oberflächenverhältnisse im Wandsegment	Zehenrücken	abaxiale Wandfläche	axiale Wandfläche
errechnete Oberfläche eines Blättchens (cm <sup>2</sup> )	1,43	1,03	0,36
errechnete Blättchenoberfläche eines 1 cm breiten Areals (cm <sup>2</sup> )	155	114	26

Die Ergebnisse in der Texttabelle 1 verdeutlichen, dass dem Wandsegment der Klaue am Zehenrücken und der abaxialen Wandfläche eine größere funktionelle Bedeutung zukommt, verglichen mit den Werten an der axialen Wandfläche. Die strukturellen Besonderheiten der Oberflächenvergrößerung des Wandsegmentes können hinsichtlich der technischen Möglich-

keiten nicht in vollem Maße beachtet werden. Somit bleiben bei der Berechnung der Oberflächenverhältnisse die Modifikationen in Form von proximalen und distalen Kappenpapillen sowie die Zergliederung der Lederhautblättchen in Terminalpapillen im distalen Bereich des Wandsegmentes unberücksichtigt. Folglich wird nur die minimale Oberflächenvergrößerung errechnet.

Die Anzahl der Blättchen pro cm (siehe Texttabelle 2) nimmt ebenfalls in proximodistaler Richtung des Wandsegmentes zu. Am Zehenrücken sind im proximalen Bereich des Wandsegmentes 83 Blättchen pro cm in proximodistal orientierten Reihen angeordnet. Ihre Anzahl erhöht sich im distalen Bereich des Wandsegmentes bis auf 125 Blättchen pro cm. Im mittleren Bereich des Wandsegmentes beginnend und zur Klauenspitze zunehmend, gabeln sich immer wieder Blättchen in zwei oder drei Nachbarblättchen (Abb. 10 c) und erhöhen ihre Anzahl um den Faktor 1,5 im distalen Bereich des Wandsegmentes.

Auf der abaxialen Wandfläche erhöht sich die Anzahl der Blättchen von proximal 91 Blättchen pro cm auf ebenfalls 125 Blättchen pro cm im distalen Bereich des Wandsegmentes. Auf der axialen Wandfläche werden 60 Blättchen pro cm im distalen Bereich ermittelt, deren Anzahl bis zum Tragrand auf 87 Blättchen pro cm zunimmt. Auch hier erhöht sich die Anzahl der Blättchen um den Faktor 1,5 bis zur distalen Region des Wandsegmentes. Im distalen Bereich des Wandsegmentes ist der Klauenbeinträger einer höheren Krafteinwirkung ausgesetzt und die Oberfläche ist seiner Beanspruchung gemäß vergrößert.

**Texttabelle 2:** Die Anzahl der Lederhautblättchen pro cm im Wandsegment der Klaue, bezogen auf die Regionen des Zehenrückens, der abaxialen und axialen Wandfläche

jeweiliger Bereich im Wandsegment	Zehenrücken	abaxiale Wandfläche	axiale Wandfläche
proximaler Bereich	83	91	-
mittlerer Bereich	100	100	-
distaler Bereich	125	125	60
Klauenspitze/Klauenrand	125	125	87

Für die Berechnung der **Oberflächenvergrößerung und -verkleinerung durch die Ausbildung eines Blättchenapparates im Wandsegment** werden folgende Parameter in Beziehung gesetzt:

- (x) das Produkt aus der Länge eines Blättchens und der Breite eines Blättchens
- (y) das Produkt aus der Länge eines Blättchens und dem Umfang eines Blättchens

**Texttabelle 3:** Die Oberflächenverhältnisse des Blättchenapparates im Wandsegment, bezogen auf die Regionen des Zehenrückens, der abaxialen und axialen Wandfläche

	<b>Zehenrücken</b>	<b>abaxiale Wandfläche</b>	<b>axiale Wandfläche</b>
<b>Oberfläche bei x (mm<sup>2</sup>)</b>	4,18	2,78	2,8
<b>Oberfläche bei y (mm<sup>2</sup>)</b>	143	103	36,5
<b>Verhältnis der Oberflächen bei x=1</b>	34	37	13

Am Zehenrücken vergrößert sich die Oberfläche des dermalen Teiles des Klauenbeinträgers durch die Blättchenaufwerfung von der Klauenbeinoberfläche bis zur dermoepidermalen Grenzfläche mindestens um den Faktor 34, der sich aus dem Verhältnis der beiden Produkte x und y ergibt. Auf der abaxialen Wandfläche beträgt der Vergrößerungsfaktor 37 und auf der axialen Wandfläche beträgt der Faktor 13. Die Oberfläche wird über die Epidermisblättchen bis zur Verankerung des epidermalen Teils des Klauenbeinträgers am inneren Kronhorn wieder auf die ursprüngliche Größe reduziert.

## **5.2 Die strukturellen Parameter der chondroapophysären Ansatzzone am Klauenbein in den unterschiedlichen Bereichen des Wandsegmentes**

(siehe Texttabelle 4 bis 6)

Die morphometrischen Untersuchungen der chondroapophysären Ansatzzone des Klauenbeinträgers am Klauenbein beziehen sich ebenfalls auf den proximalen, mittleren und distalen Bereich des Wandsegmentes, einschließlich des Margo solaris als vierten Bereich, jeweils im Zehenrücken, der abaxialen sowie die zwei Bereiche auf der axialen Wandfläche. Der wesentlichste Unterschied zwischen den einzelnen Arealen des Wandsegmentes besteht darin, dass im proximalen Bereich keine vierzonale Ansatzzone des Klauenbeinträgers ausgebildet ist. Der Übergang vom Kron- zum Wandsegment, den dieses Areal vornehmlich beschreibt, stellt den Übergang zu einem Bereich mit einem 'regelmäßigen' Aufbau des Klauenbeinträgers dar.

Die für den Zehenrücken der Klaue ermittelten Werte unterscheiden sich tendenziell nicht von den erhobenen Daten an der abaxialen und axialen Wandfläche.

Die Zone des verkalkten Faserknorpels wird in proximodistaler Richtung des Wandsegmentes dicker und erreicht am Margo solaris jeweils ihr Maximum. Am Zehenrücken ist die Zone des verkalkten Faserknorpels im mittleren Bereich des Wandsegmentes 77  $\mu\text{m}$  dick und an der Klauenbeinspitze 104  $\mu\text{m}$ . Auf der abaxialen Wandfläche erhöht sich ihre Dicke von 80  $\mu\text{m}$  im mittleren Bereich des Wandsegmentes bis auf eine Dicke von 96  $\mu\text{m}$  am Klauenbeinrand. Auf der axialen Wandfläche beträgt die Dicke der Zone des verkalkten Faserknorpels 58  $\mu\text{m}$  und nimmt bis zum Klauenbeinrand bis auf 87  $\mu\text{m}$  zu.

Die Mineralisationszone respektive Tidemark markiert den Übergang von der Zone des verkalkten zur Zone des unverkalkten Faserknorpels. Die Anzahl der Mineralisationszonen pro Flächeneinheit ist im mittleren Bereich des Wandsegmentes höher als in den anderen untersuchten Bereichen des Wandsegmentes. Am Zehenrücken und der abaxialen Wandfläche reicht die Anzahl der Mineralisationszonen im mittleren Bereich des Wandsegmentes von 1 bis 5. Im distalen Bereich und am Klauenbeinrand sind 1 bis 3 Mineralisationszonen ausgebildet. Die Dicke der Mineralisationszone nimmt in proximodistaler Richtung des Wandsegmentes zu. Am Zehenrücken ist die Mineralisationszone im mittleren Bereich des Wandsegmentes 6  $\mu\text{m}$  dick. Im distalen Bereich des Wandsegmentes erreicht sie eine Dicke von 8  $\mu\text{m}$  und an der Klauenbeinspitze durchschnittlich 9  $\mu\text{m}$ . Die Dicke der Mineralisationszone erreicht ihr Maximum von 31  $\mu\text{m}$  im distalen Bereich des Wandsegmentes. Auf der abaxialen Wandfläche ist die Mineralisationszone im mittleren Bereich des Wandsegmentes durchschnittlich 6  $\mu\text{m}$  dick, im distalen Bereich 7  $\mu\text{m}$  und am Klauenbeinrand 8  $\mu\text{m}$ . Auf der axialen Wandfläche ist die Mineralisationszone im distalen Bereich des Wandsegmentes durchschnittlich 5  $\mu\text{m}$  und am Klauenbeinrand 6  $\mu\text{m}$  dick.

Am Zehenrücken ist der Abstand von der ersten (klauenbeinnahen) bis zur letzten (klauenbeinfernen) Mineralisationszone im mittleren Bereich des Wandsegmentes 120  $\mu\text{m}$  groß. Dieser Abstand verringert sich im distalen Bereich des Wandsegmentes auf 72  $\mu\text{m}$  und vergrößert sich an der Klauenbeinspitze wieder auf 137  $\mu\text{m}$ . Auf der abaxialen Wandfläche beträgt der Abstand von der ersten bis zur letzten Mineralisationszone im mittleren Bereich des Wandsegmentes 103  $\mu\text{m}$ . Dieser Abstand verringert sich im distalen Bereich des Wandsegmentes auf 58  $\mu\text{m}$  und nimmt am Klauenbeinrand wieder auf 124  $\mu\text{m}$  zu. Auf der axialen Wandfläche beträgt der Abstand von der ersten bis zur letzten Mineralisationszone im distalen Bereich des Wandsegmentes 52  $\mu\text{m}$  und vergrößert sich am Klauenbeinrand auf 111  $\mu\text{m}$ .

---

Die Zone des unverkalkten Faserknorpels wird in proximodistaler Richtung des Wandsegmentes dicker und erreicht am Klauenbeinrand ihr Maximum. Am Zehenrücken ist die Zone des unverkalkten Faserknorpels im mittleren Bereich des Wandsegmentes 30  $\mu\text{m}$  dick und an der Klauenbeinspitze 65  $\mu\text{m}$ . Auf der abaxialen Wandfläche erhöht sich ihre Dicke von 34  $\mu\text{m}$  im mittleren Bereich des Wandsegmentes bis auf eine Dicke von 66  $\mu\text{m}$  am Klauenbeinrand. Auf der axialen Wandfläche beträgt die Dicke der Zone des unverkalkten Faserknorpels 35  $\mu\text{m}$  und nimmt bis zum Klauenbeinrand bis auf 56  $\mu\text{m}$  zu.



**Texttabelle 4:** Ergebnisse der morphometrischen Untersuchung der strukturellen Parameter des Klauenbeinträgers am **Zehenrücken der Klaue**, um eine Relation in den unterschiedlichen Bereichen des Wandsegmentes exemplarisch zu ermöglichen; es handelt sich um keine absoluten Werte. (n=16)

**Legende zu den Texttabellen 4 bis 6:** **Kb:** Klauenbein, **Lbl:** Lederhautblättchen, **Mittelwert:** arithmetischer Mittelwert, **Stabw:** Standardabweichung, **Min:** minimaler Wert, **Max:** maximaler Wert

<b>strukturelle Parameter des Klauenbeinträgers im Wandsegment</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>Stabw</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>
<b>proximaler Bereich</b>				
Abstand von der Kb-oberfläche bis zur Basis der Lbl (Stratum reticulare) (mm)	2,05	0,59	1,05	3,2
Höhe der Lbl (Stratum lamellatum) (mm)	1,02	0,22	0,51	1,41
Basisbreite der Lbl (mm)	0,12	0,02	0,04	0,22
Umfang der Lbl (mm)	1,9	0,44	1	3
<b>mittlerer Bereich</b>				
Abstand von der Kb-oberfläche bis zur Basis der Lbl (Stratum reticulare) (mm)	2,33	0,54	1,24	4,33
Höhe der Lbl/Stratum lamellatum (mm)	1,37	0,39	0,63	2,67
Basisbreite der Lbl (mm)	0,1	0,02	0,04	0,2
Umfang der Lbl (mm)	2,51	0,82	1,15	6,48
Dicke der Zone des verkalkten Faserknorpels (µm)	77	51,95	6	200
Anzahl der Mineralisationszonen (µm)	2,42	1,1	1	5
Dicke der Mineralisationszonen (µm)	6	2,52	2,53	16
Abstand von der ersten bis zur letzten Mineralisationszone (µm)	119,41	76,6	7,37	286
Dicke der Zone des unverkalkten Faserknorpels (µm)	30,26	13,1	4,22	75,45
<b>distaler Bereich</b>				
Abstand von der Kb-oberfläche bis zur Basis der Lbl (Stratum reticulare) (mm)	2,51	0,63	1,4	3,88
Höhe der Lbl/Stratum lamellatum (mm)	1,95	0,25	1,37	2,89
Basisbreite der Lbl (mm)	0,08	0,02	0,04	0,18
Umfang der Lbl (mm)	3,73	0,59	2,17	8,07
Dicke der Zone des verkalkten Faserknorpels (µm)	99,15	49,17	8,07	259,43
Anzahl der Mineralisationszonen (µm)	1,6	0,63	1	3
Dicke der Mineralisationszonen (µm)	7,91	4,19	2,57	30,94
Abstand von der ersten bis zur letzten Mineralisationszone (µm)	72,75	39,64	14,19	187,96
Dicke der Zone des unverkalkten Faserknorpels (µm)	52,5	40,84	7,47	222,44
<b>Klauenspitze</b>				
Abstand von der Kb-oberfläche bis zur Basis der Lbl (Stratum reticulare) (mm)	4,85	1,84	1,33	15,88
Höhe der Lbl (Stratum lamellatum) (mm)	2,49	0,74	0,89	5
Basisbreite der Lbl (mm)	0,08	0,007	0,008	0,12
Umfang der Lbl (mm)	4,91	1,41	1,23	8,87
Dicke der Zone des verkalkten Faserknorpels (µm)	104,49	78,22	9,14	333,33
Anzahl der Mineralisationszonen (µm)	2,14	0,77	1	3
Dicke der Mineralisationszonen (µm)	9,23	3,93	2,82	25
Abstand von der ersten bis zur letzten Mineralisationszone (µm)	137,88	64	46,5	315,37
Dicke der Zone des unverkalkten Faserknorpels (µm)	65,48	12,74	20,5	124,16

**Texttabelle 5:** Ergebnisse der morphometrischen Untersuchung der strukturellen Parameter des Klauenbeinträgers an der **abaxialen Wandfläche der Klaue**, um eine Relation in den unterschiedlichen Bereichen des Wandsegmentes exemplarisch zu ermöglichen; es handelt sich um keine absoluten Werte. (n=16)

<b>strukturelle Parameter des Klauenbeinträgers im Wandsegment</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>Stabw</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>
<b>proximaler Bereich</b>				
Abstand von der Kb-oberfläche bis zur Basis der Lbl (Stratum reticulare) (mm)	3,05	0,43	1,5	4,2
Höhe der Lbl (Stratum lamellatum) (mm)	1,18	0,21	0,53	1,42
Basisbreite der Lbl (mm)	0,11	0,02	0,06	0,23
Umfang der Lbl (mm)	2,3	0,43	1,3	3,7
<b>mittlerer Bereich</b>				
Abstand von der Kb-oberfläche bis zur Basis der Lbl (Stratum reticulare) (mm)	3,3	0,52	1,21	4,73
Höhe der Lbl (Stratum lamellatum) (mm)	1,38	0,38	0,62	2,66
Basisbreite der Lbl (mm)	0,1	0,02	0,04	0,2
Umfang der Lbl (mm)	2,7	0,70	1,11	4,48
Dicke der Zone des verkalkten Faserknorpels (µm)	80,22	11,21	43	103
Anzahl der Mineralisationszonen (µm)	2,5	1,2	1	5
Dicke der Mineralisationszonen (µm)	6,03	2,49	2,5	15
Abstand von der ersten bis zur letzten Mineralisationszone (µm)	103,14	16,6	83,31	143
Dicke der Zone des unverkalkten Faserknorpels (µm)	34,1	10,1	6,31	55,84
<b>distaler Bereich</b>				
Abstand von der Kb-oberfläche bis zur Basis der Lbl (Stratum reticulare) (mm)	3,4	0,65	1,5	4,06
Höhe der Lbl (Stratum lamellatum) (mm)	2	0,23	1,21	2,99
Basisbreite der Lbl (mm)	0,08	0,02	0,04	0,19
Umfang der Lbl (mm)	3,89	0,54	2,14	6,07
Dicke der Zone des verkalkten Faserknorpels (µm)	88,04	19,13	68,8	102,5
Anzahl der Mineralisationszonen (µm)	1,8	0,65	1	3
Dicke der Mineralisationszonen (µm)	7,01	3,91	4,55	14,3
Abstand von der ersten bis zur letzten Mineralisationszone (µm)	58,24	28,96	36,14	88,96
Dicke der Zone des unverkalkten Faserknorpels (µm)	60,25	32,56	27,53	98,54
<b>Klauenrand</b>				
Abstand von der Kb-oberfläche bis zur Basis der Lbl (Stratum reticulare) (mm)	4,79	1,74	1,53	12,56
Höhe der Lbl (Stratum lamellatum) (mm)	2,4	0,73	0,9	5
Basisbreite der Lbl (mm)	0,08	0,007	0,009	0,12
Umfang der Lbl (mm)	4,83	1,32	1,25	8,98
Dicke der Zone des verkalkten Faserknorpels (µm)	96,03	28,22	79,25	154,63
Anzahl der Mineralisationszonen (µm)	2	0,77	1	3
Dicke der Mineralisationszonen (µm)	8,1	2,85	5,73	12,54
Abstand von der ersten bis zur letzten Mineralisationszone (µm)	124,45	34	78,64	165,32
Dicke der Zone des unverkalkten Faserknorpels (µm)	66,2	11,98	23,21	123,18

**Texttabelle 6:** Ergebnisse der morphometrischen Untersuchung der strukturellen Parameter des Klauenbeinträgers an der **axialen Wandfläche der Klaue**, um eine Relation in den unterschiedlichen Bereichen des Wandsegmentes exemplarisch zu ermöglichen; es handelt sich um keine absoluten Werte. (n=16)

<b>strukturelle Parameter des Klauenbeinträgers im Wandsegment</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>Stabw</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>
<b>distaler Bereich</b>				
Abstand von der Kb-oberfläche bis zur Basis der Lbl (Stratum reticulare) (mm)	2,14	0,55	1,2	3,65
Höhe der Lbl (Stratum lamellatum) (mm)	0,84	0,25	0,66	1,89
Basisbreite der Lbl (mm)	0,17	0,02	0,08	0,29
Umfang der Lbl (mm)	1,6	0,34	0,83	2,07
Dicke der Zone des verkalkten Faserknorpels (µm)	58,03	17,23	38,7	82,5
Anzahl der Mineralisationszonen (µm)	1,5	0,49	1	3
Dicke der Mineralisationszonen (µm)	5,01	3,82	3,55	12,6
Abstand von der ersten bis zur letzten Mineralisationszone (µm)	52,87	30,51	27,36	98,21
Zone des unverkalkten Faserknorpels (µm)	35,54	22,83	17,53	78,39
<b>Klauenrand</b>				
Abstand von der Kb-oberfläche bis zur Basis der Lbl (Stratum reticulare) (mm)	3,45	1,63	1,94	8,32
Höhe der Lbl (Stratum lamellatum) (mm)	1,09	0,69	0,59	2,85
Basisbreite der Lbl (mm)	0,11	0,005	0,009	0,18
Umfang der Lbl (mm)	2,05	1,34	1,05	5,64
Dicke der Zone des verkalkten Faserknorpels (µm)	87,63	24,62	54,73	108,14
Anzahl der Mineralisationszonen (µm)	1,7	0,78	1	3
Dicke der Mineralisationszonen (µm)	6,1	2,85	3,69	22,54
Abstand von der ersten bis zur letzten Mineralisationszone (µm)	111,41	32,21	70,83	141,02
Dicke der Zone des unverkalkten Faserknorpels (µm)	56,3	11,78	23,55	85,03

## 6. Ergebnisse der Untersuchungen an der belasteten Klaue

### 6.1 Ergebnisse der lichtmikroskopischen Untersuchungen an der belasteten Klaue

Die Druckkraft des Körpergewichtes führt zu einem Absenken des Klauenbeines in der Hornkapsel, das das Fasersystem des Klauenbeinträgers aktiviert, wodurch sich die Zugkraft diskontinuierlich auf die Hornkapsel fortpflanzt und der Klauenmechanismus induziert wird. Die geformte Interzellulärsubstanz des dermalen Teils des Klauenbeinträgers, zu denen das kollagene, elastische und retikuläre Fasersystem zählt, verändert sein Erscheinungsbild im Belastungszustand der Klaue, wobei sich die retikulären Fasern der lichtmikroskopischen Untersuchung entziehen. Die Zonen des parallelfaserigen straffen Bindegewebes werden unter Einwirkung der Zugkraft gestreckt und die Kollagenfasern verlieren ihr typisches wellenartiges Erscheinungsbild. Die Kollagenfaserbündel ziehen bei Belastung geradlinig vom Klauenbein bis in die Spitzen der Lederhautblättchen hinein. Durch diese Zugwirkung kommt es zur Dehnung der kollagenen und elastischen Fasern im Stratum reticulare des Wandsegmentes, was zu einer Vergrößerung des Abstandes von der Klauenbeinoberfläche bis zur Basis der Lederhautblättchen in allen untersuchten Bereichen führt (Abb. 19 d/e).

Die Kollagenfasern im Stratum lamellatum verlieren ebenfalls ihre wellenartige Beschaffenheit und verlängern sich zunehmend. Dieser Vorgang führt dazu, dass sich die Lederhautblättchen verlängern und schmaler werden (Abb. 19 c). Durch die feste Verankerung von Lederhaut- und Epidermisblättchen strecken sich die Epidermisblättchen unter Belastung ebenfalls, vor allem in ihrem Firstbereich (Abb. 19 e). Die elastischen Fasern, die in hoher Konzentration an der Basis der Lederhautblättchen anzutreffen sind, ändern ihren bogenförmigen Verlauf und ziehen nunmehr im spitzen Winkel an die dermoepidermale Grenzfläche. Das hat wiederum Auswirkungen auf die Form und Ausrichtung der basalen zytoplasmatischen Ausläufer der Basalzellen, die sich im gesamten Lederhautblättchen in Richtung der Zugkräfte orientieren. Die basalen zytoplasmatischen Ausläufer der Basalzelle werden länger und dadurch schmaler und die Unregelmäßigkeit ihrer Oberflächenkontur verstreicht. Im entspannten Zustand des Klauenbeinträgers nimmt die Schlingelung des Blättchenapparates in proximodistaler Richtung zu und verstreicht bei der Belastung

Bei der Auswertung des lichtmikroskopischen Probenmaterials an der belasteten Klaue wird ersichtlich, dass Zusammenhangstrennungen im Bereich des Wandsegmentes immer an den gleichen Lokalisationen vorkommen. Die Zusammenhangstrennungen lassen auf strukturelle Schwachpunkte des Klauenbeinträgers schließen, die Prädilektionsstellen für Klauenerkrankungen darstellen. Zusammenhangstrennungen kommen durch die unter Belastung entstandene

ne Dehnung des Klauenbeinträgers vornehmlich in den Bereichen der dermoepidermalen Grenzfläche im Stratum lamellatum vor. Trennungen im Zellgefüge sind ferner an der Basis von Lederhautblättchen zu erkennen, wo die Aufspaltung von kräftigen Kollagenfaserbündeln in feinere Kollagenfaserzusammenflüsse in das Stratum lamellatum erfolgt. Trennungen können auch im Stratum spinosum festgestellt werden, in einem Bereich, wo junge verhornende Epidermiszellen liegen. Vereinzelt sind Zerreißen im Übergangsbereich vom Knochen zur chondroapophysären Ansatzzone zu erkennen.

## **6.2 Ergebnisse der morphometrischen Untersuchungen von den natürlichen Belastungsverhältnissen an der Klaue**

Das Ziel der durchgeführten Messungen ist es, eine Aussage über die natürlichen Belastungsverhältnisse an der Klaue zu treffen und die auftretenden Formveränderungen auch darzustellen. Überdies ermöglichen die Ergebnisse eine relative Belastbarkeit der Strukturen in den einzelnen Segmenten der Klaue abzuleiten. Ferner wurde die bei der Belastung verursachte Lageveränderung des Klauenbeines, in Form eines Absenkens und einer Rotation, ermittelt. Die Differenz vom belasteten und unbelasteten Zustand (in Prozentangabe) der Klaue wurde als Mittelwert mit Standardabweichung angegeben sowie die minimale und maximale Längenänderung. Die Messergebnisse der morphometrischen Untersuchung sind im Anhang tabellarisch aufgeführt. Die bei der Belastung auftretenden Längenänderungen der einzelnen Messstrecken werden in Prozenten angegeben, da dies über den veränderten Zustand der Klaue mehr aussagt als Millimeterangaben, die einen direkten Vergleich vom Ruhe- und Spannungszustand ausschließen. Die Ergebnisse der Längenänderungen (%) werden zur besseren Veranschaulichung in Abbildungen und Diagramme übertragen. Die Kurvenverläufe der Diagramme beschreiben die durchschnittlichen Längenänderungen (Differenz des belasteten vom unbelasteten Zustand der Klaue) in den sagittalen Schnittebenen 1 bis 3 und den transversalen Schnittebenen 1 bis 7.

Unter Belastung wird die Aufgabe des Klauenbeinträgers offensichtlich, der die Druckkraft der Körperlast in eine Zugkraft umwandelt. Diese Funktion des Klauenbeinträgers induziert den Klauenmechanismus, also die reversible Verformung der Klauenkapsel. Da sich der Schwerpunkt der Untersuchung auf den dermo-subkutanen Bereich der Klaue konzentriert, geben nur einige Messstrecken direkt über die Verformung der Klauenkapsel Auskunft.

Um eine dreidimensionale Betrachtung von den Formveränderungen an der Klaue zu bekommen, wird diese nicht nur in zwei verschiedenen Ebenen untersucht, sondern diese Ebenen nochmals unterteilt. Dazu werden die morphometrischen Messungen in drei Sagittalebene vorgenommen, miteinander verglichen und beurteilt, wobei die axiale Sagittalscheibe die erste, die mittlere Sagittalscheibe die zweite und die abaxiale Sagittalscheibe die dritte Ebene widerspiegelt. Die Messungen an der un- und belasteten Klaue wurden auch an sieben unterschiedlichen Transversalebene vorgenommen.

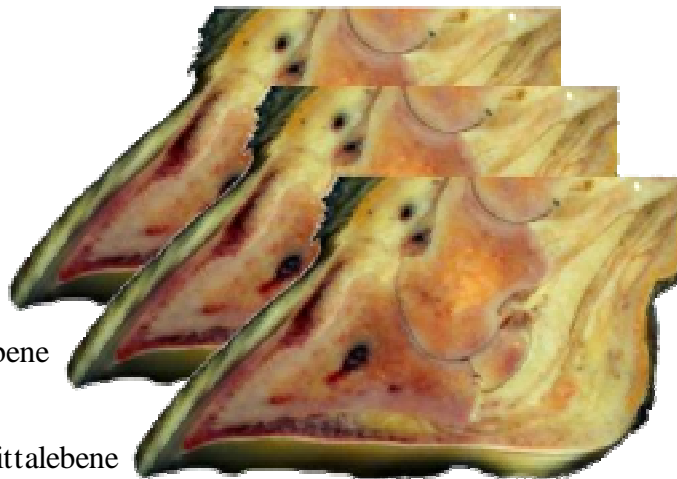
**Textabb. 17:**

Sagittalebene der Klaue

axiale/erste Sagittalebene

mittlere/zweite Sagittalebene

abaxiale/dritte Sagittalebene



**Textabb. 18:**

Transversalebene der Klaue

erste Transversalebene

zweite Transversalebene

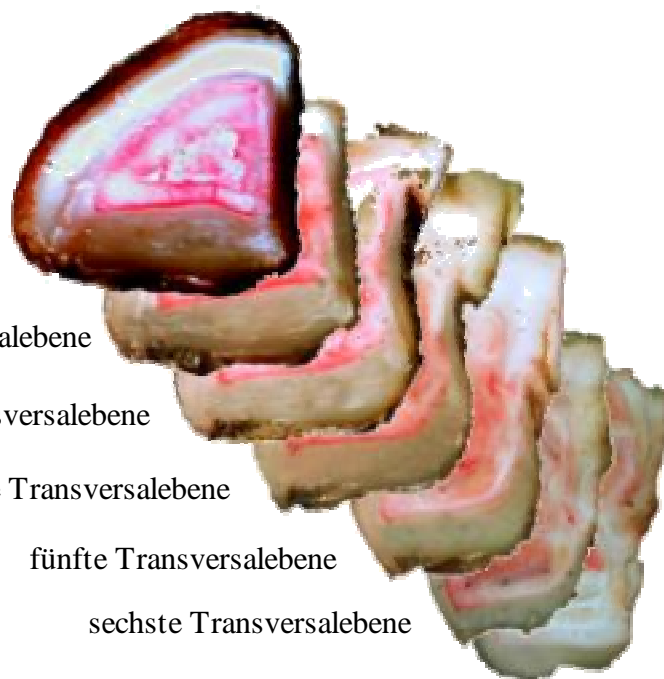
dritte Transversalebene

vierte Transversalebene

fünfte Transversalebene

sechste Transversalebene

siebte Transversalebene

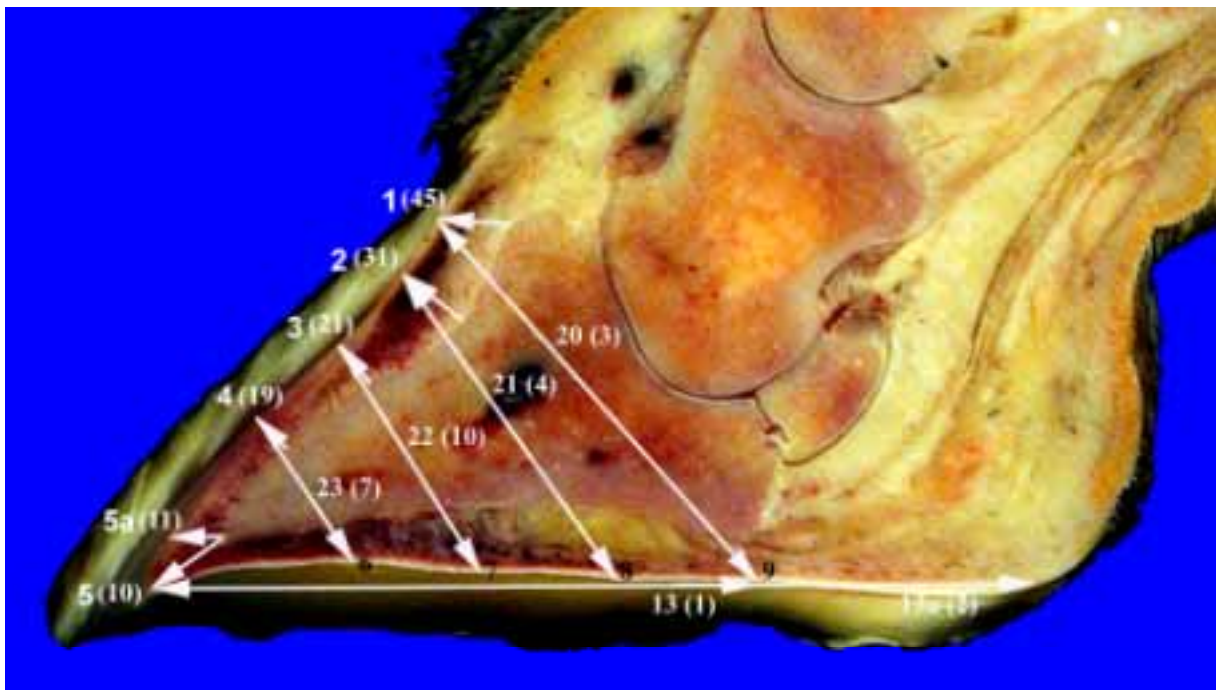


### 6.2.1 Ergebnisse der Messungen in den sagittalen Schnittebenen 1 bis 3 an der unbelasteten und belasteten Klaue

Die für die mittlere Sagittalebene (Ebene 2) ermittelte Längenänderung wird stellvertretend für die beiden anderen Ebenen jeweils in der Abbildung dargestellt. Die für die sagittalen Schnittebenen 1 bis 3 ermittelten Ergebnisse sind sowohl in den Textdiagrammen als auch im Anhang aufgeführt. Unterschieden wird zwischen den bei der Belastung auftretenden Längenänderungen der dermo-subkutanen Bereiche, die entweder eine Verlängerung oder eine Verkürzung der Messstrecken zur Folge haben.

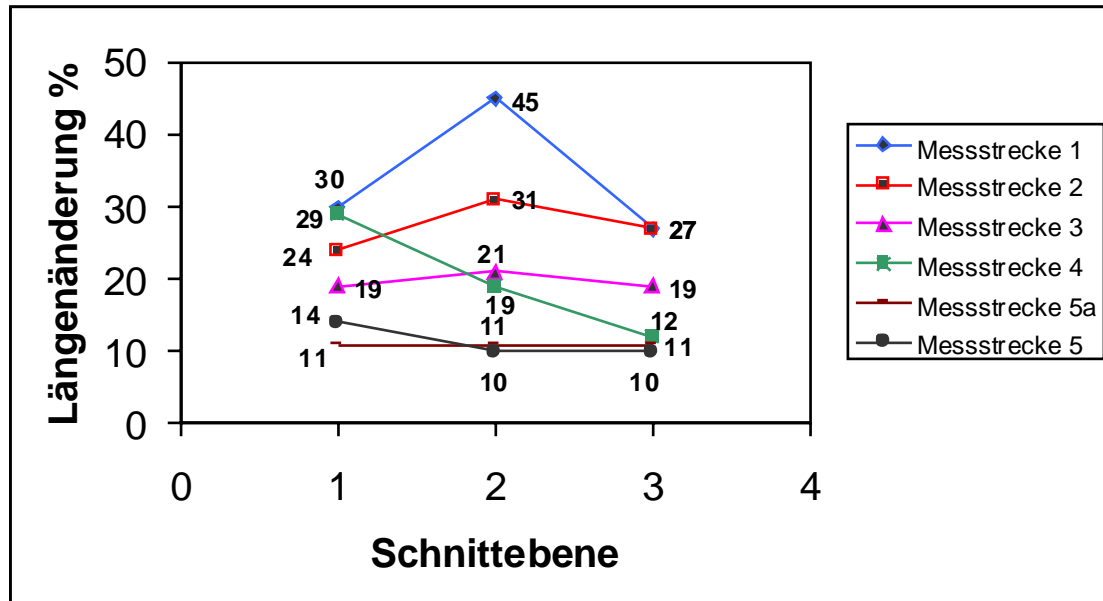
#### Textabb. 19: mittlerer Sagittalschnitt (Ebene 2) der Klaue, Übersicht für die folgenden Textdiagramme 1 bis 3

Die Messstrecken sind mit den Ziffern 1 bis 23 gekennzeichnet. Die **Längenzunahme** der einzelnen Messstrecken sind in Klammern aufgeführt und werden in Prozenten angegeben. Es werden Messlängen ermittelt, die dermo-subkutane Bereiche der Klaue betreffen, die sich bei der Belastung **ausdehnen**.



Die Abbildung veranschaulicht, dass die Dermis im Bereich des Zehenrückens der Klaue von einer Ausdehnung in hohem Maße betroffen ist, was den Abstand von den Messstrecken 1 bis 4 zu den jeweiligen diagonalen Messpunkten nach sich zieht. Zum Beispiel vergrößert sich die Messstrecke 1 bei der Belastung um 45 %. Der dermo-subkutane Bereich der Messstrecke 2 dehnt sich bei der Belastung um 31 %, dahingegen vergrößert sich die Messstrecke 20 nur um 3 %. In den folgenden Textdiagrammen wird auf die Längenzunahme der Messstrecken der drei Sagittalebene im Einzelnen eingegangen.

**Textdiagramm 1:** Prozentuale Längenzunahme der Messstrecken 1 bis 5 am Zehenrücken der Klaue in den sagittalen Schnittebenen 1 bis 3 (1 = axiale, 2 = mittlere, 3 = abaxiale Sagittalebene). Die Messstrecken 1 bis 5 sind jeweils mit einem Symbol dargestellt.

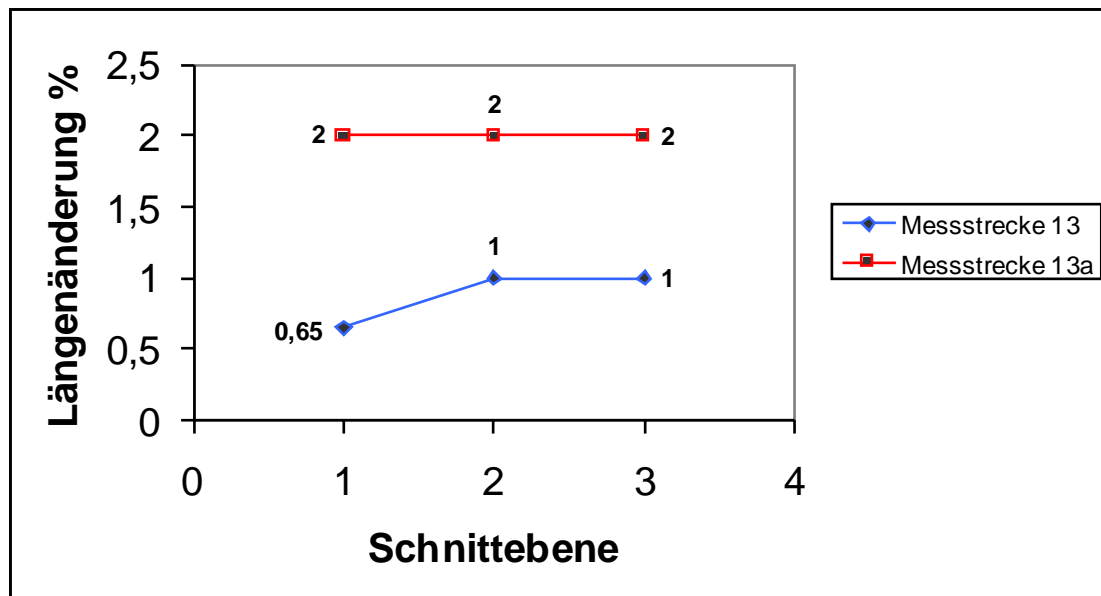


Die proximalen Messstrecken am Zehenrücken (MS 1 und 2) spiegeln den Bereich des Kronpolsters wider, der sich bei der Belastung um 45 % ausdehnt. Am Beginn des mittleren Bereiches des Wandsegmentes (MS 3) ist eine Erweiterung von 19 bis 21 % in den Schnittebenen 1 bis 3 zu vermerken. Bei den Messstrecken 1 bis 3 ist die Medianebene der Klaue (Schnittebene 2) am stärksten von der Ausdehnung betroffen. Im mittleren Bereich des Wandsegmentes (MS 4) findet die größte Längenänderung (29 %) in der axialen Ebene (Schnittebene 1) statt, um sich in den anderen beiden Ebenen (mediane und abaxiale Schnittebene) um 11 % zu erweitern. Auch an der Klauenspitze (MS 5 a und 5) erweitert sich der Dermisabschnitt bei der Belastung um 11 %. Ein Bewegungsmuster ist darin zu erkennen, dass sich der dermo-skutane Bereich im proximalen Abschnitt des Zehenrückens weit stärker ausdehnt als der dermale Bereich im distalen Abschnitt des Zehenrückens. Unter Belastung wird die Funktion des Klauenbeinträgers (MS 3 bis 5) deutlich, der die Drucklast des Körpergewichtes in eine Zugkraft umwandelt und das Klauenbein an der Hornkapsel aufhängt. Dabei dehnt sich der dermale Teil des Klauenbeinträgers und induziert so den Klauenmechanismus, eine elastische Verformung der Klauenkapsel.

Der dermale Bereich an der Klauenspitze dehnt sich bei der Belastung (10 %) einerseits durch die Aufhängung des Klauenbeines an der Hornkapsel und die damit verbundene Vergrößerung des Abstandes vom Klauenbein bis zur unverhornten Epidermis und andererseits dadurch, dass sich das Klauenbein nach plantar verlagert.

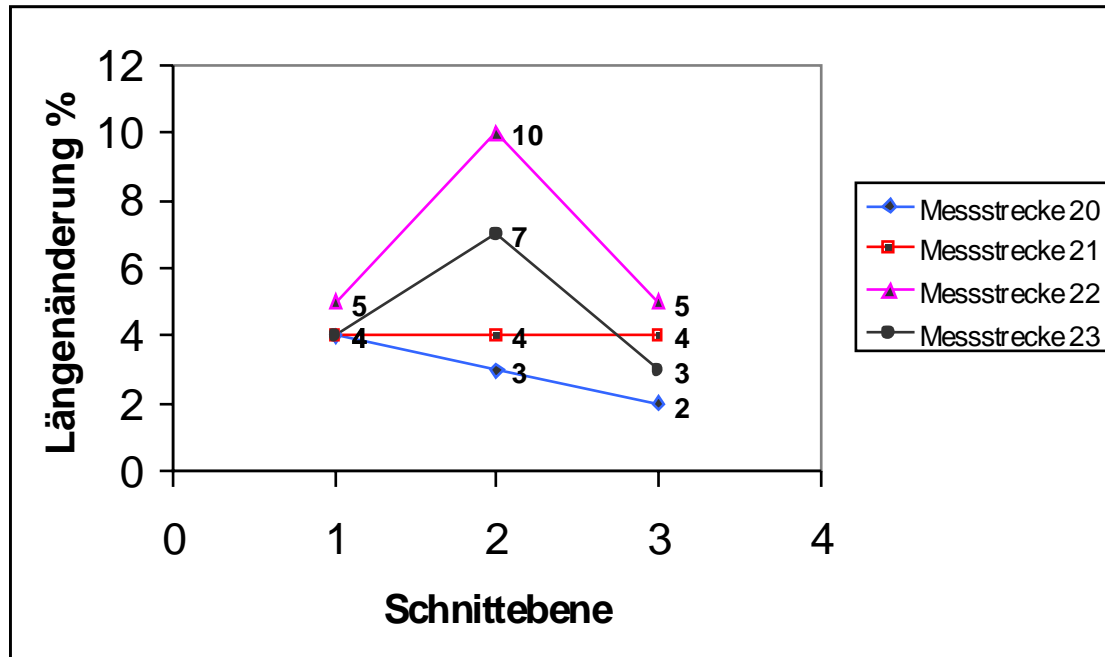


**Textdiagramm 2:** Prozentuale Längenzunahme der Messstrecken 13 und 13 a in den sagittalen Schnittebenen 1 bis 3 (1 = axiale, 2 = mittlere, 3 = abaxiale Sagittalebene). Die Messstrecken 13 und 13 a sind jeweils mit einem Symbol dargestellt.



Im Bereich der Fußungsfläche erweitert sich die Messstrecke (MS 13) von der Klauenspitze bis zum Ende der Klauenbeingrundfläche bei der Belastung nur bis zu 1 %. Die gesamte Länge der Fußungsfläche dehnt sich um 2 % (MS 13a). Bei der Belastung wird die Klauenrundfläche breiter und nur um 2 % länger.

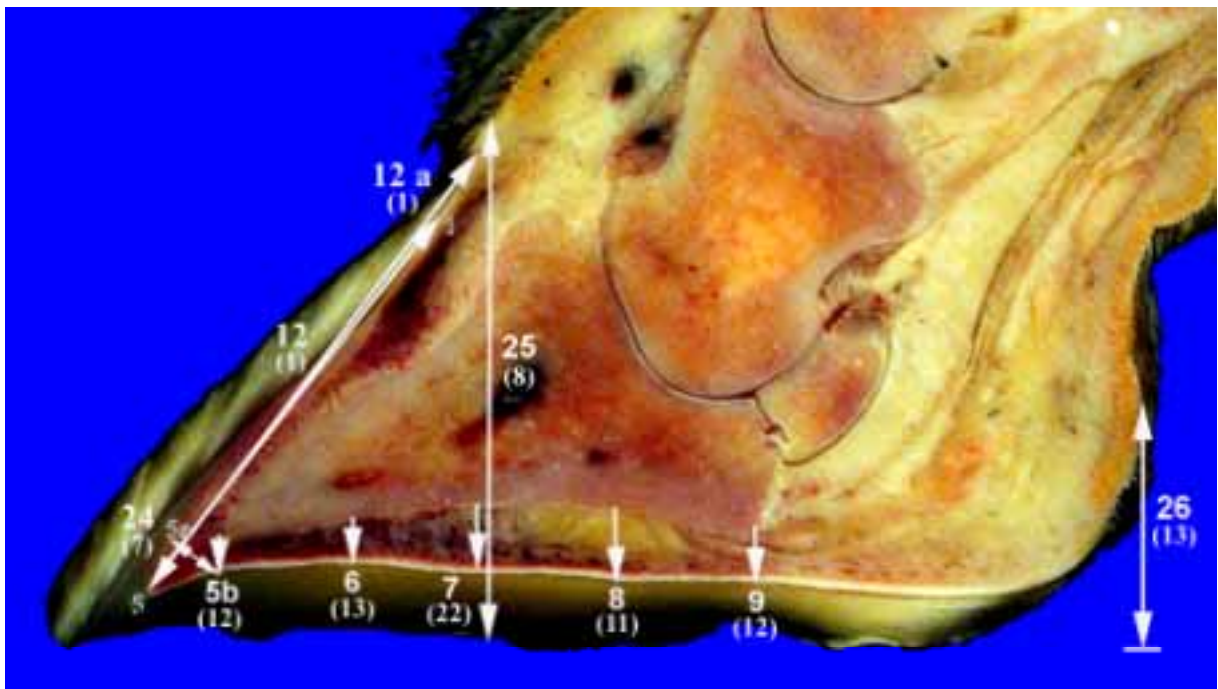
**Textdiagramm 3:** Prozentuale Längenzunahme der Messstrecken 20 bis 23 in den sagittalen Schnittebenen 1 bis 3 (1 = axiale, 2 = mittlere, 3 = abaxiale Sagittalebene). Die Messstrecken 20 bis 23 sind jeweils mit einem Symbol dargestellt.



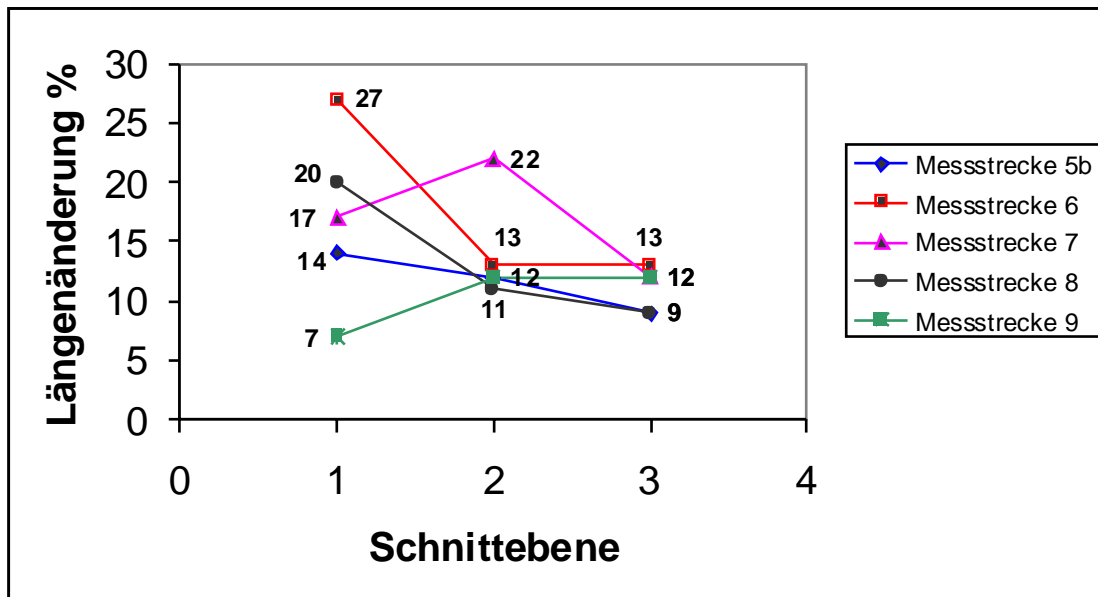
Die diagonalen Messstrecken 20 bis 23 verlängern sich bei der Belastung dadurch, dass sich das Klauenbein senkt und sich dabei der Abstand vom Klauenbein bis zur unverhornten Epidermis im gesamten Bereich des Zehenrückens vergrößert. Die Medianebene (Schnittebene 2) ist bei den Messstrecken 22 und 23 stärker von der Längenänderung betroffen als die axiale (1) und abaxiale (3) Schnittebene. Der Abstand vom Beginn des mittleren Bereiches des Wandsegmentes bis zum Messpunkt 7 der Fußungsfläche (MS 22) dehnt sich in der Medianebene (Schnittebene 2) der Klaue mit 10 % im Gegensatz zu den anderen Diagonalen am stärksten aus. Das lässt den Schluss zu, dass sich die Hornkapsel im Bereich des Zehenrückens senkt und, dass sich die Klauengrundfläche nach innen wölbt und sich eine Art Hohlkehlung bildet.

**Textabb. 20: mittlerer Sagittalschnitt (Ebene 2) der Klaue; Übersicht für die folgenden Textdiagramme 4 bis 6**

Die Messstrecken sind mit den Ziffern 5b bis 26 gekennzeichnet. Die **Längenabnahme** der einzelnen Messstrecken sind in Klammern aufgeführt und werden in Prozenten angegeben. Es werden Messlängen von dermo-subkutanen Bereichen der Klaue ermittelt, die sich bei der Belastung **komprimieren**.



**Textdiagramm 4:** Prozentuale Längenabnahme der Messstrecken 5 b bis 9 der Fußungsfläche der Klaue in den sagittalen Schnittebenen 1 bis 3 (1 = axiale, 2 = mittlere, 3 = abaxiale Sagittalebene). Die Messstrecken 5b bis 9 sind jeweils mit einem Symbol dargestellt.

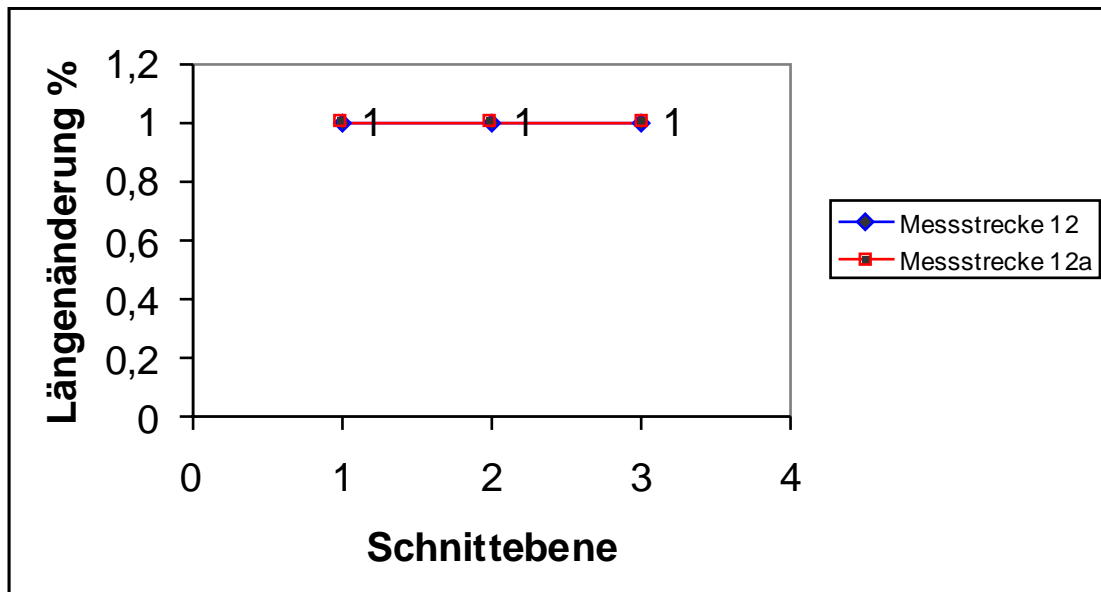


Das Klauenbein senkt sich im Bereich der Klauenspitze (MS 5b) bis zu 14 % in der axialen Schnittebene (1). An der Klauenspitze senkt sich das Klauenbein im Bereich des Sohlenkörpers um 12 % und im Bereich des abaxialen Sohlenschenkels nur um 9 %; das bedeutet, dass sich das Klauenbein am stärksten axial (14 %) senkt.

Das Klauenbein senkt sich am Übergang vom dermalen Sohlenkörper (MS 6) zum dermo-subkutanen Bereich des distalen Ballensegmentes stärker als an der Klauenspitze. Auch im Bereich des axialen Sohlenschenkels verkürzt sich der Abstand vom Klauenbein bis zur unverhornten Epidermis am stärksten, folglich rotiert das Klauenbein axial. Im Bereich des Ballenpolsters (MS 7) senkt sich das Klauenbein bei der Belastung um bis zu 22 %. Die Medianebene (Schnittebene 2) ist stärker von der Längenänderung betroffen als die axiale und abaxiale Schnittebene.

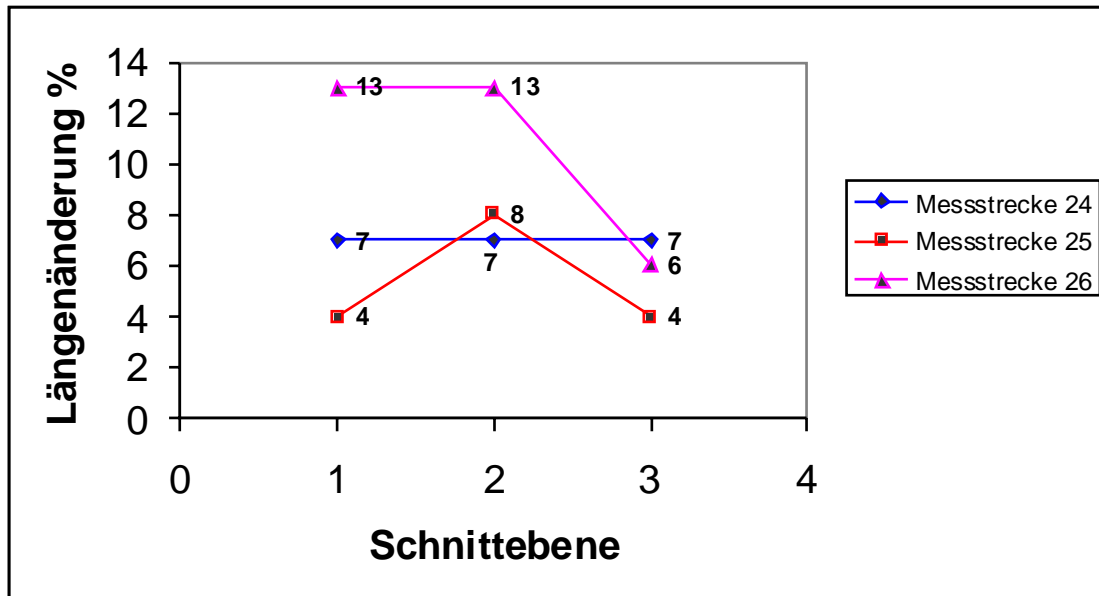
Am Ende des Ballenpolsters (MS 8) senkt sich das Klauenbein in der Schnittebene 1 (axial) um 20 %, wobei die Längenänderung in der Schnittebene 3 (abaxial) abnimmt und nur noch ein Wert von 9 % ermittelt wird. Im Bereich der Ansatzstelle der tiefen Beugesehne, im Bereich des proximalen Ballensegmentes, ist eine Längenänderung von höchstens 12 % festzustellen. Bei einem Vergleich der Messstrecken im apikalen Bereich der Klaue mit denen im plantaren Bereich ist zu erkennen, dass apikal ein stärkeres Absenken des Klauenbeines zu vermerken ist als plantar.

**Textdiagramm 5:** Prozentuale Längenabnahme der Messstrecken 12 und 12 a im Bereich des Zehenrückens der Klaue in den sagittalen Schnittebenen 1 bis 3 (1 = axiale, 2 = mittlere, 3 = abaxiale Sagittalebene). Die Messstrecken 12 und 12 a sind jeweils mit einem Symbol dargestellt.



Sowohl die Messstrecke vom Kronrand bis zur Klauenspitze (MS 12) als auch die Messstrecke vom Saumsegment bis zur Klauenspitze (MS 12a) verkürzt sich bei der Belastung nur um 1 % in jeder der drei sagittalen Schnittebenen, was durch ein Absenken der Hornkapsel am Zehenrücken verursacht wird.

**Textdiagramm 6:** Prozentuale Längenabnahme der Messstrecken 24 und 26, die sich auf ein Absenken der Klauenkapsel bei der Druckbelastung respektive der elastischen Verformung der Hornkapsel beziehen. Die Längenabnahme wird in den sagittalen Schnittebenen 1 bis 3 berücksichtigt (1 = axiale, 2 = mittlere, 3 = abaxiale Sagittalebene). Die Messstrecken 24 bis 26 sind jeweils mit einem Symbol dargestellt.



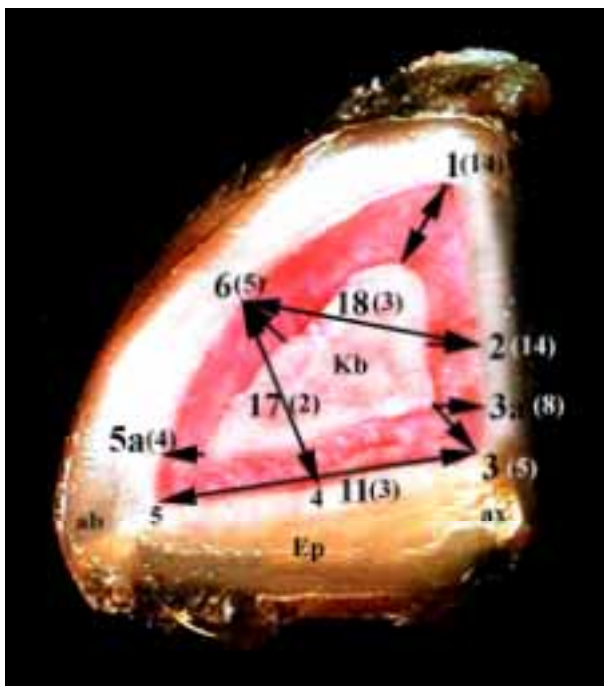
Der dermale Bereich von den Messpunkten 5a im Zehenrücken bis zu den Messpunkten 5b an der Fußungsfläche (MS 24) verkürzt sich bei der Belastung, was durch ein Absenken und Plantarverlagerung des Klauenbeines ermöglicht wird. Die vertikale Distanz vom proximalen Ursprung des Saumhornes im Bereich des Zehenrückens bis einschließlich der Epidermis des distalen Ballensegmentes (MS 25) verkürzt sich um 4 bis 8 %, wobei die mediane Schnittebene (2) mit 8 % am stärksten betroffen ist. Auch die vertikale Distanz vom Beginn des Ballenhornes im proximalen Ballensegment verkürzt sich um 13 % bis zu einer horizontalen Verlängerung der Fußungsfläche (MS 26).

### 6.2.2 Ergebnisse der Messungen in den transversalen Schnittebenen 1 bis 7 an der unbelasteten und belasteten Klaue

Die für die transversale Schnittebene 1 ermittelten Ergebnisse werden exemplarisch in der Abbildung dargestellt. Die für die transversalen Schnittebenen 1 bis 7 ermittelten Ergebnisse sind sowohl in den folgenden Textdiagrammen als auch im Anhang aufgeführt. Unterschieden wird wiederum zwischen den bei der Belastung auftretenden Längenänderungen der dermo-subkutanen Bereiche, die sich ausdehnen oder komprimieren, folglich eine Verlängerung oder eine Verkürzung der Messstrecken zur Folge haben.

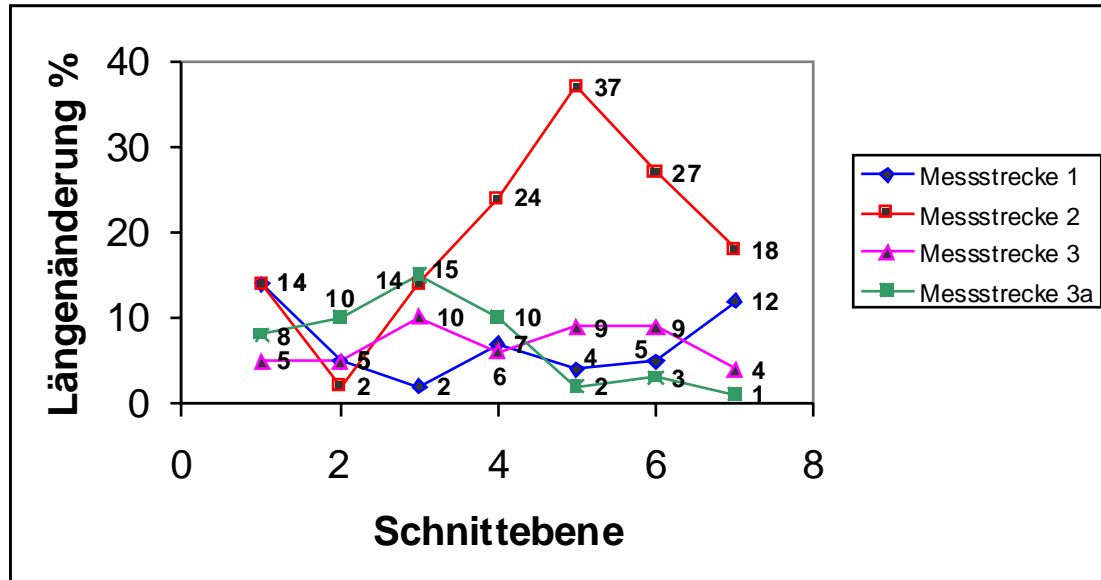
#### Textabb. 21: Transversalschnitt der Klaue (Schnittebene 1); Übersicht für die folgenden Textdiagramme 7 bis 9

Die Messstrecken sind mit den Ziffern 1 bis 18 gekennzeichnet. Die **Längenzunahme** der einzelnen Messstrecken in der Schnittebene 1 sind in Klammern aufgeführt und werden in Prozenten angegeben. Es werden Messlängen von dermo-subkutanen Bereichen der Klaue ermittelt, die sich bei der Belastung **ausdehnen**.



Die Abbildung veranschaulicht, dass sich die Dermis im Bereich der axialen und abaxialen Wandfläche der Klaue ausdehnt. Der Bereich der Fußungsfläche wird ebenfalls bei der Belastung geringgradig gedehnt. In den folgenden Textdiagrammen wird auf die Längenänderung der Messstrecken in allen sieben Transversalebene im Einzelnen eingegangen.

**Textdiagramm 7:** Prozentuale Längenänderung der Messstrecken 1 bis 3a. Die Dermis der **axialen Wandfläche** erweitert sich bei der Belastung. Die Längenänderungen werden in den transversalen Schnittebenen 1 bis 7 berücksichtigt. Die Messstrecken 1 bis 3a sind jeweils mit einem Symbol dargestellt.

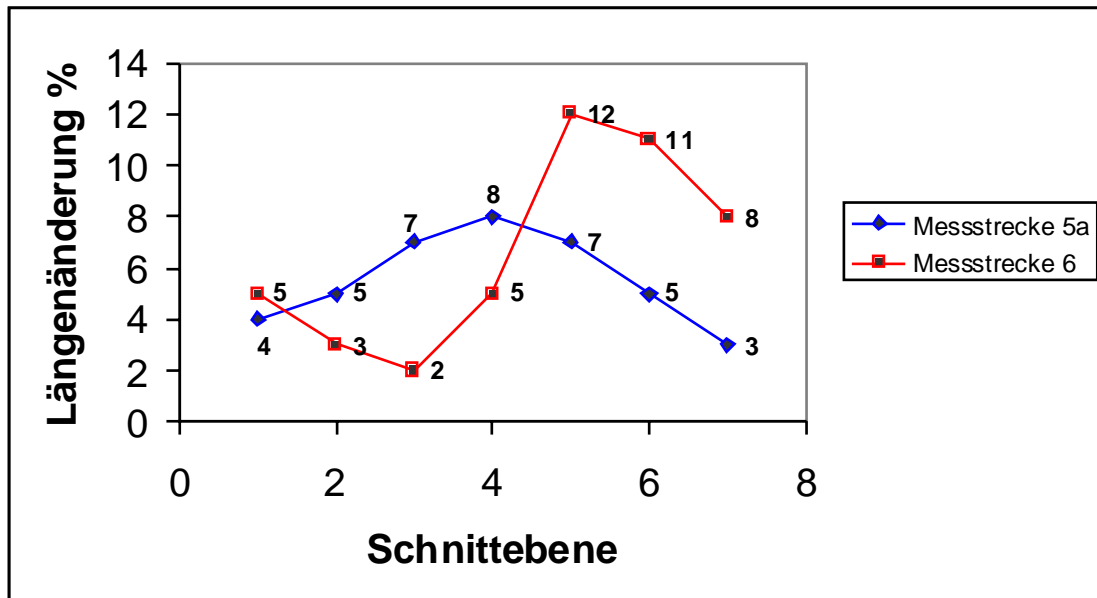


Der Abstand der Verbindungslinie vom proximalen Punkt des Klauenbeines bis zum proximalen Punkt der unverhornten Epidermis der Klauenkapsel (MS 1) vergrößert sich in jeder Schnittebene (1 bis 7). Im apikalen Bereich der Klaue ist die Längenänderung dieser Messstrecke größer (14 %), wird bis zur Mitte der Klaue niedriger (6 %) und steigt plantar wieder an (12 %).

Die axiale Wandfläche der Klaue (MS 2) erweitert sich im Bereich der Klauenspitze um 14 %, in der Medianebene der Klaue um 37 % und im plantaren Bereich wiederum nur um 18 %. Im Bereich der Klauenspitze dehnt sich der dermale Bereich (MS 3a und 3) bis zu 15 % aus, während die Längenänderung der Messstrecken im plantaren Bereich der Klaue relativ gering ist.

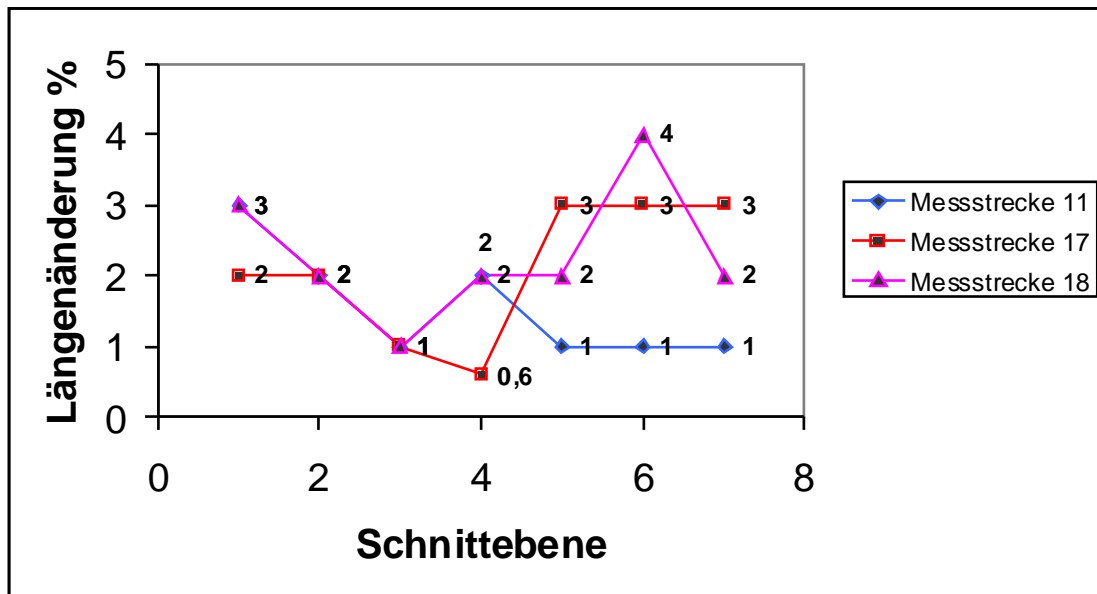


**Textdiagramm 8:** Prozentuale Längenzunahme der Messstrecken 5 a und 6, die den dermalen Bereich der **abaxialen Wandfläche** kennzeichnen. Die Längenänderungen werden in den transversalen Schnittebenen 1 bis 7 berücksichtigt. Die Messstrecken 5a und 6 sind jeweils mit einem Symbol dargestellt.



Der Bereich der abaxialen Wandfläche erweitert sich bei der Belastung. Das Klauenbein senkt sich bei der Belastung und beeinflusst die Messstrecke 5a, die sich bis zur Mitte der Klaue kontinuierlich vergrößert und sich plantar wieder verkürzt. An der abaxialen Wandfläche dehnt sich der dermale Bereich bei der Belastung je nach Schnittebene von 2 bis 12 % aus. Im apikalen Bereich der Klaue ist die Längenänderung geringer als im plantaren Bereich, da sich hier die Klauenkapsel erweitert.

**Textdiagramm 9:** Prozentuale Längenzunahme der Messstrecken 11, 17 und 18. Die Längenänderungen werden in den transversalen Schnittebenen 1 bis 7 berücksichtigt. Die Messstrecken 11, 17 und 18 sind jeweils mit einem Symbol dargestellt.

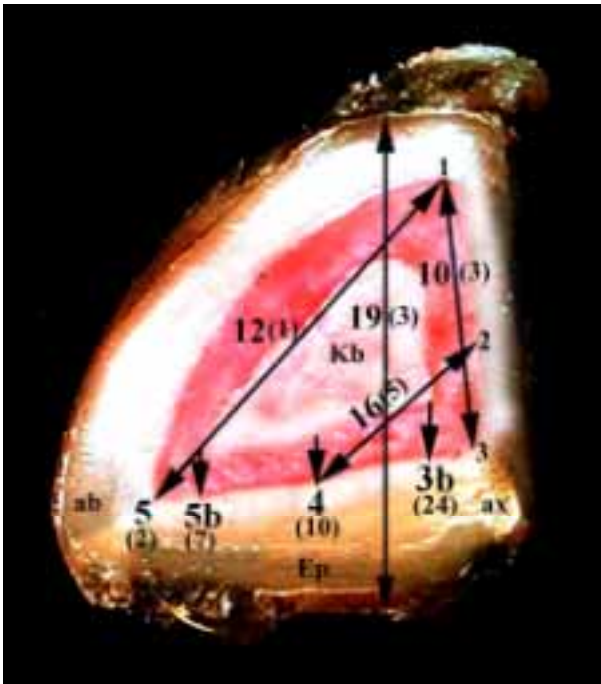


Bei der Belastung vergrößert sich die Messstrecke (MS 11) im Bereich der unverhornten Epidermis an der Fußungsfläche. An der Klauenspitze ist die größte Ausdehnung (3 %) dieser Messstrecke zu ermitteln, was für eine Verbreiterung der Klauengrundfläche in diesem Bereich spricht. Die Messstrecke 17 stellt eine diagonale Linie von der Mitte der abaxialen Wandfläche (6) bis zur Mitte der Fußungsfläche (4) dar, die sich verlängert. Das wird einerseits durch ein Absenken des Klauenbeines induziert und andererseits durch eine Erweiterung der Hornkapsel (siehe MS 6) an der abaxialen Wandfläche. An den Messstrecken im plantaren Bereich der Klaue sind stärkere Längenänderungen messbar als apikal.

Die Messstrecke 18 stellt eine diagonale Linie von der Mitte der axialen Wandfläche (2) bis zur Mitte der Fußungsfläche dar. Diese diagonale Messstrecke verlängert sich von 1 % bis zu 4 % im plantaren Bereich der Klaue. Dieser Befund bestätigt die Ergebnisse der Messstrecke 2, bei der ebenfalls eine stärkere Längenänderung plantar der Klaue ermittelt werden kann.

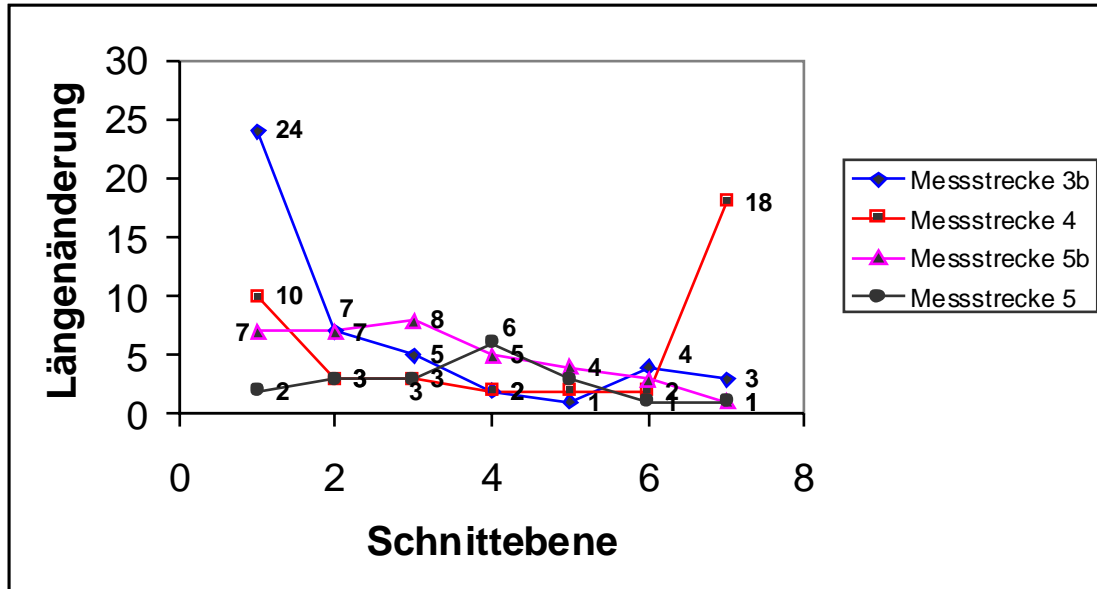
**Textabb. 22: Transversalschnitt der Klaue (Schnittebene 1); Übersicht für die folgenden Textdiagramme 10 und 11**

Die Messstrecken sind mit den Ziffern 3b bis 19 gekennzeichnet. Die **Längenabnahme** der einzelnen Messstrecken in der Schnittebene 1 sind in Klammern aufgeführt und werden in Prozenten angegeben. Die Messstrecken markieren dermo-subkutane Bereiche, die bei der Belastung **komprimiert** werden.



Die Abbildung veranschaulicht, dass sich die Messstrecken der dermo-subkutanen Bereiche bei der Belastung verkürzen. Durch ein Einsinken der Klauenkapsel am Zehenrücken kommt es zu einer Verkürzung der Messstrecken 10, 12 und 19. In den folgenden Textdiagrammen wird auf die Längenabnahme der Messstrecken der sieben Transversalebene im Einzelnen eingegangen.

**Textdiagramm 10:** Prozentuale Längenabnahme der Messstrecken 3 b bis 19. Die Längenänderungen werden in den transversalen Schnittebenen 1 bis 7 berücksichtigt. Die Messstrecken 3 b bis 5 sind jeweils mit einem Symbol dargestellt.



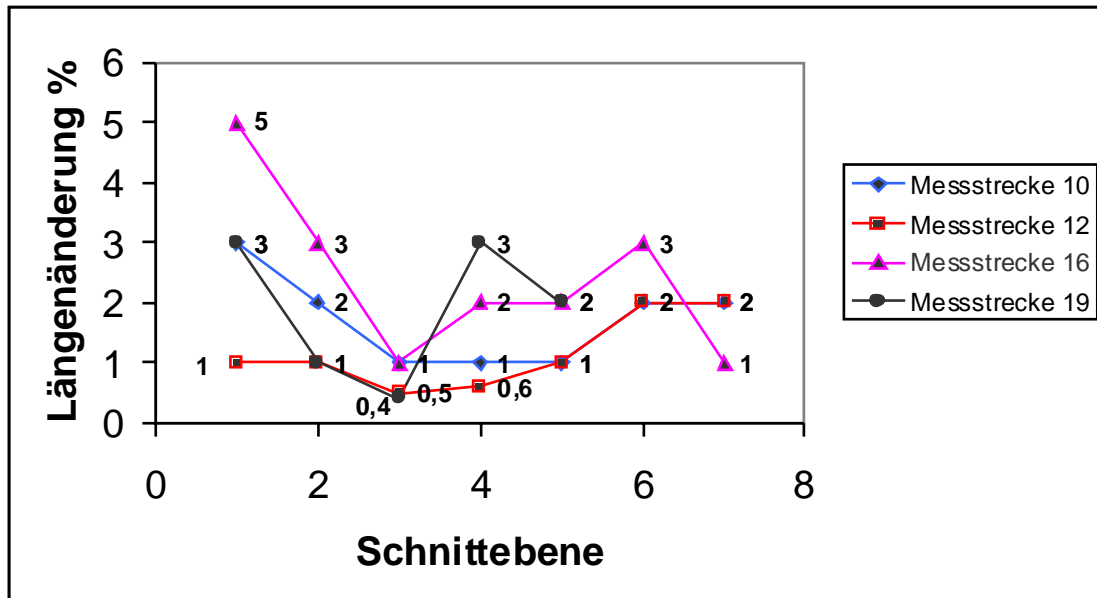
Die vertikale Messstrecke vom distalen Eckpunkt des Klauenbeines bis zur unverhornten Epidermis der Fußungsfläche (MS 3b) verkürzt sich im apikalen Bereich der Klaue bis zu 24 % und im plantaren Bereich der Klaue nur um 3 %. Folglich senkt sich das Klauenbein auf der axialen Wandfläche der Klaue im Bereich der Klauenspitze deutlich stärker als plantar.

Im Vergleich zur Messstrecke (MS 5b) auf der abaxialen Wandfläche senkt sich das Klauenbein abaxial weniger als axial.

Die Dermisabschnitte verkürzen sich an der solearen Klauenbeingrundfläche (MS 4) apikal sowie plantar am stärksten. Das Klauenbein senkt sich stärker in diesen Bereichen als in der Medianebene der Klaue. An der Klauenspitze ist eine Längenänderung von 10 % festzustellen und im Ballenbereich von 18 %.

Der Dermisabschnitt der Messstrecke 5 wird durch das Absenken des Klauenbeines kaum komprimiert.

**Textdiagramm 11:** Prozentuale Längenabnahme der Messstrecken 10, 12, 16 und 19. Die Längenänderungen werden in den transversalen Schnittebenen 1 bis 7 berücksichtigt und durch die Verformung der Klauenkapsel mit beeinflusst. Die Messstrecken 10, 12, 16 und 19 sind jeweils mit einem Symbol dargestellt.



Bei der Belastung verkürzen sich die Dermisabschnitte einerseits vom proximalsten bis zum axialsten Punkt der unverhornten Epidermis (MS 10) und andererseits vom proximalsten Punkt bis zum abaxialsten Punkt (MS 12). Diese Längenänderungen werden durch die Verformung der Klauenkapsel verursacht, die im Zehenrücken einsinkt. Die Längenänderung der Messstrecken (MS 10 und 12) bleiben in den Schnittebenen gering und erreichen Werte von 0,5 bis 3 %.

Die Messstrecke 16 spiegelt den Bereich von der Mitte der axialen Wandfläche bis zur Mitte der Fußungsfläche wider, der sich bei der Belastung verkürzt, da das Klauenbein axial rotiert. Die Messstrecke 19 verkürzt sich, was durch das Einsenken der Hornkapsel am Zehenrücken der Klaue verursacht wird. Dieses Ergebnis korreliert mit den Messungen der Längenänderung der Messstrecken 10 und 12.

### 6.3 Zusammenfassung der Formveränderungen an der belasteten Klaue

Die bei der Belastung durch das Körpergewicht entstehenden Kräfte werden über das Skelettsystem an das Klauenbein weitergeleitet und einerseits als Druckkräfte über das Ballen- und Sohlensegment und andererseits als Zugkräfte über den Klauenbeinträger in Bewegung umgesetzt (Abb. 20 a).

Das Klauenbein senkt sich bei der Belastung nicht gleichmäßig, weder in der horizontalen noch vertikalen Ebene. An der Klauenspitze neigt es sich axial um 24 % und abaxial nur um 7 %. Dahingegen senkt es sich im plantaren Bereich der Klaue sowohl axial als auch abaxial nur um 3 %, einerseits aufgrund der Polstereinrichtung im Ballensegment und andererseits aufgrund der Komprimierung der Klaue in der Transversalebene. Das Klauenbein senkt sich folglich unter Druckeinwirkung im apikalen Bereich der Klaue stärker als plantar, wobei es axial rotiert (Abb. 20 b).

Bei der Belastung wird im Bereich des Wandsegmentes das kollagene Fasersystem des Klauenbeinträgers aktiviert und die Druckkraft der Körperlast in eine Zugkraft umgewandelt und der Klauenmechanismus induziert (Abb. 20 a). Folglich wird der dermo-subkutane Bereich im gesamten Zehenrücken der Klaue enorm gedehnt, was zu einer Vergrößerung des Abstandes von der Klauenbeinoberfläche bis zur unverhornten Epidermis um 45 % im proximalen Bereich der Klaue führt und distal um 10 %. Am Zehenrücken spiegeln die proximalen Messstrecken den Bereich des elastischen Kronpolsters wider, das die Krafteinwirkung abfedert und dämpft. Die vierzonale Ansatzzone des Klauenbeinträgers ist im mittleren Bereich des Wandsegmentes einer starken Zugwirkung ausgesetzt und dehnt sich bis zu 21 %. In diesem Bereich ziehen die Kollagenfaserbündel mit einem Öffnungswinkel von 75° von der Klauenbeinoberfläche bis ins Stratum lamellatum hinein. Der dermale Bereich ist an der Klauenspitze sehr stark druck- und zugbeansprucht. Er dehnt sich bei der Belastung in der sagittalen Ebene einerseits aufgrund eines Absenkens des Klauenbeines um 11 % und andererseits verleiht der Zug der tiefen Beugesehne dem Klauenbein eine nach plantar rotierende Bewegungsrichtung um 11 %.

Die strukturellen Elemente des Sohlen- und Ballensegmentes übernehmen bei der Belastung der Klaue eine Stütz- und Stoßbrechungsfunktion. Durch die bei der Fußung der Klaue verursachte Absenkung des Klauenbeines wird das viskoelastische Kissen der Sohlenlederhaut komprimiert und der Druck wird einerseits über die Sohlenepidermis weitergeleitet und andererseits über die Dermis der abaxialen und axialen Wandfläche, die sich dorsoplantar immer stärker ausdehnt. Bei der Belastung wirkt der Stoßbrechungsmechanismus, wobei vor allem das Ballenpolster und das Ballenhorn als funktionelle Einheit die Druckkräfte aufnehmen und weiterleiten. Eine Kompression des viskoelastischen Kissens um 22 % wirkt im Bereich des distalen Ballens wie ein Stoßdämpfer für die bei der Belastung einwirkende Druckkraft. Der dermo-subkutane Bereich stellt sich im Ballensegment als eine speziell entwickelte Polstereinrichtung dar, die aus drei längs parallel verlaufenden mächtigen Fettkörpern besteht. Im Bereich des apikalen Ballensegmentes bilden Polsterkissen eine Querverbindung vom axialen

zum abaxialen Fettkörper. Die Bewegung der abaxialen und axialen Wandflächen ist bilateral nicht symmetrisch. Die größere Ausdehnung der dermo-subkutanen Strukturen ist an der axialen Wandfläche zu erkennen und rührt nicht nur von der Rotation des Klauenbeines her, sondern auch von der Ausdehnung des axialen Ballenpolsters in den Bereich der axialen Wandfläche hinein. Durch die axiale Rotation des Klauenbeines ist der Klauenbeinträger auf der kontralateralen, abaxialen Wandfläche mehr zugbeansprucht.

Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass sich das dermo-subkutane respektive dermale Areal in den Bereichen des Processus extensorius, dem Kronsegment, der Ansatzzone des Klauenbeinträgers am Zehenrücken, insbesondere der Klauenbeinspitze, der Bereich des Sohlensegmentes, des distalen Ballensegmentes und des Tuberculum flexorium besonders stark ausdehnt und diese Areale hauptsächlich mechanisch beansprucht werden. Bereiche mit einer faserknorpeligen Ansatzzone wie das Wand- und Sohlensegment, Ansatzzonen für Bänder und Sehnen sind multidirektionalen Zugkräften ausgesetzt, verbunden mit dem Fehlen eines Polsters und bedürfen in pathogenetischer Hinsicht einer größeren Aufmerksamkeit. Bereiche, die über ein Subkutispolster verfügen, wie das Kron- und das Ballensegment werden bei der Belastung ebenfalls stark beansprucht, sind aber auch dementsprechend geschützt.

Eine Seitenansicht der belasteten Klaue legt dar, dass die Höhe der Klauenkapsel bei der Belastung abnimmt und sich der Ballen senkt. Eine Vorderansicht auf die laterale und mediale Klaue zeigt ein deutliches Spreizen der beiden Klauen und bestätigt das Absenken des proximalen Zehenrückens. Bei der Belastung senkt sich das Klauenbein und die auftretende Zugwirkung des Klauenbeinträgers an der Hornkapsel führt zu einem Absenken der oberen Hälfte der dorsalen Zehenwand in Richtung Klauenmitte. Dabei verengt sich die Klauenkapsel bei der Belastung in der apikalen Hälfte und erweitert sich im plantaren Bereich, wobei sie sich am Kronrand mehr ausdehnt als am Tragrand. Trotz der Erweiterung im Trachtenbereich der Klaue, verlängert sich die Klauengrundfläche um 2 %.

Die entlastete Klaue zeigt bei einer Ansicht auf die Klauengrundfläche eine deutliche Hohlkehlung, die im belasteten Zustand nicht mehr in dem Maße ausgeprägt ist. Der Vorteil dieser Hohlkehlung liegt in dem elastischen Nachgeben der Dermis und dem Schutz vor Quetschungen, wenn sich das Klauenbein bei der Belastung senkt.

Besonders Bereiche der Klaue, in denen der Abstand von der Klauenbeinoberfläche bis zur unverhornten Epidermis gering ist, verfügen über ein hochspezialisiertes funktionelles System, sind aber aufgrund dessen auch anfälliger bei Fehlbelastungen.

Es ist ein Belastungsgradient festzustellen, der proximodistal der Klaue ansteigt und dorsoplantar abnimmt.